



This electronic version (PDF) was scanned by the International Telecommunication Union (ITU) Library & Archives Service from an original paper document in the ITU Library & Archives collections.

La présente version électronique (PDF) a été numérisée par le Service de la bibliothèque et des archives de l'Union internationale des télécommunications (UIT) à partir d'un document papier original des collections de ce service.

Esta versión electrónica (PDF) ha sido escaneada por el Servicio de Biblioteca y Archivos de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) a partir de un documento impreso original de las colecciones del Servicio de Biblioteca y Archivos de la UIT.

(ITU) للاتصالات الدولي الاتحاد في والمحفوظات المكتبة قسم أجراه الضوئي بالمسح تصوير نتاج (PDF) الإلكترونية النسخة هذه والمحفوظات المكتبة قسم في المتوفرة الوثائق ضمن أصلية ورقية وثيقة من نقلًا.

此电子版（PDF版本）由国际电信联盟（ITU）图书馆和档案室利用存于该处的纸质文件扫描提供。

Настоящий электронный вариант (PDF) был подготовлен в библиотечно-архивной службе Международного союза электросвязи путем сканирования исходного документа в бумажной форме из библиотечно-архивной службы МСЭ.



XVII ПЛЕНАРНАЯ АССАМБЛЕЯ
ДЮССЕЛЬДОРФ, 1990



МЕЖДУНАРОДНЫЙ СОЮЗ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ

ОТЧЕТЫ МККР, 1990 г.

(ВКЛЮЧАЯ РЕШЕНИЯ)

ПРИЛОЖЕНИЕ К ТОМУ VII

СТАНДАРТЫ ЧАСТОТЫ
И СИГНАЛЫ ВРЕМЕНИ

МККР МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНСУЛЬТАТИВНЫЙ КОМИТЕТ ПО РАДИО



XVII ПЛЕНАРНАЯ АССАМБЛЕЯ
ДЮССЕЛЬДОРФ, 1990



МЕЖДУНАРОДНЫЙ СОЮЗ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ

ОТЧЕТЫ МККР, 1990 г.

(ВКЛЮЧАЯ РЕШЕНИЯ)

ПРИЛОЖЕНИЕ К ТОМУ VII

**СТАНДАРТЫ ЧАСТОТЫ
И СИГНАЛЫ ВРЕМЕНИ**

МККР МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНСУЛЬТАТИВНЫЙ КОМИТЕТ ПО РАДИО

ISBN 92-61-04234-1

ПРИЛОЖЕНИЕ К ТОМУ VII

СТАНДАРТЫ ЧАСТОТЫ И СИГНАЛЫ ВРЕМЕНИ

(7-я Исследовательская комиссия)

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
План томов I—XV XVII Пленарной Ассамблеи МККР (см. том VII — Рекомендации)	
Распределение текстов XVII Пленарной Ассамблеи МККР в томах I—XV (см. том VII — Рекомендации)	
Содержание	I
Перечень текстов в порядке их нумерации	III
Перечень текстов, которые были аннулированы	V
 <i>Раздел 7A — Глоссарий</i>	
(В данном разделе нет отчетов)	
 <i>Раздел 7B — Спецификации служб стандартных частот и сигналов времени</i>	
(В данном разделе нет отчетов)	
 <i>Раздел 7C — Системы передачи и сравнения</i>	
Отчет 267-7 Стандартные частоты и сигналы времени. <i>Характеристики излучения стандартных частот и сигналов времени в распределенных полосах и характеристики передающих станций со стабилизированными частотами, работающих по регулярным программам вне распределенных полос частот</i>	3
Отчет 270-3 Оптимальное использование частотного спектра для высокоточных сигналов времени	31
Отчет 271-8 Полученные стабильность и точность стандартных частот и сигналов времени в ОНЧ и НЧ диапазонах	33
Отчет 363-7 Методы передачи и распространения времени и стандартных частот	42
Отчет 518-8 Координация и передача времени и частоты через спутники	51
Отчет 576-3 Передача стандартной частоты посредством стабилизации несущей вещательной станции	80
Отчет 577-3 Передача сигналов и кодов времени методом фазовой модуляции амплитудно-модулированного сигнала в вещательных передатчиках	81

Отчет 578-3	Коды времени	83
Отчет 731-2	Обзор пользователей передач стандартных частот и сигналов времени	89
Отчет 732-3	Предложения по снижению взаимных помех между излучениями стандартных частот и сигналов времени в диапазонах 6 и 7	100
Отчет 735-1	Значение передач стандартных частот и сигналов времени в диапазоне 5	105
Отчет 736-1	Частотное разделение между службой передачи сигналов времени и радиолокационной, фиксированной спутниковой, фиксированной и подвижной службами в полосах частот вблизи 14, 21, 26 и 31 ГГц	106
Отчет 896-1	Документация по изменениям в передаваемых сигналах времени	113
Отчет 897-2	Методы точной передачи времени на короткие расстояния	114
Отчет 1016-1	Телевизионные методы передачи и распространения времени и частоты	118
Отчет 1017	Характеристики задержки сигналов в антеннах	123
Отчет 1152	Основные источники высокостабильных сигналов в УВЧ-СВЧ диапазонах, использующие синхронизированные генераторы	125

Раздел 7D — Характеристики источников и формирование шкал времени

Отчет 364-6	Характеристики генераторов стандартных частот	129
Отчет 439-5	Релятивистские эффекты в наземной координатной системе времени	150
Отчет 579-4	Алгоритм шкалы времени и связанные с ним проблемы усреднения	155
Отчет 580-3	Описание характеристик частотных и фазовых шумов	160
Отчет 738-3	Частотные генераторы в дальнем инфракрасном, инфракрасном и видимом световом участках спектра	172
Отчет 898-2	Рабочие испытания эталонных часов в системах времени	179

Решения

Решение 65	Справочник по использованию спутниковых передач времени и частоты	189
------------	---	-----

ПЕРЕЧЕНЬ ТЕКСТОВ В ПОРЯДКЕ ИХ НУМЕРАЦИИ

ПРИЛОЖЕНИЕ К ТОМУ VII

	Стр.
РАЗДЕЛ 7А: Глоссарий	1
РАЗДЕЛ 7В: Спецификации служб стандартных частот и сигналов времени	1
РАЗДЕЛ 7С: Системы передач и сравнения	3
РАЗДЕЛ 7D: Характеристики источников и формирование шкал времени	129

ОТЧЕТЫ	Раздел	Стр.	ОТЧЕТЫ	Раздел	Стр.
267-7	7C	3	731-2	7C	89
270-3	7C	31	732-3	7C	100
271-8	7C	33	735-1	7C	105
363-7	7C	42	736-1	7C	106
364-6	7D	129	738-3	7D	172
439-5	7D	150	896-1	7C	113
518-8	7C	51	897-2	7C	114
576-3	7C	80	898-2	7D	179
577-3	7C	81	1016-1	7C	118
578-3	7C	83	1017	7C	123
579-4	7D	155	1152	7C	125
580-3	7D	160			

Примечание. — В данном перечне не воспроизводятся Решения, которые уже представлены в содержании в порядке их нумерации.

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

**ПЕРЕЧЕНЬ ТЕКСТОВ, КОТОРЫЕ БЫЛИ АННУЛИРОВАНЫ В КОНЦЕ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ПЕРИОДА 1986—1990 ГОДОВ**

(В целях облегчения поиска какого-либо текста указаны номера страниц тома VII
XVI Пленарной Ассамблеи, Дубровник, 1986 г.)

ПРИЛОЖЕНИЕ К ТОМУ VII

Текст	Название	Стр. тома VII Дубровник, 1986
Отчет 730-1 ⁽¹⁾	Глоссарий	1

⁽¹⁾ Рекомендация 686.

РАЗДЕЛ 7А: ГЛОССАРИЙ

Отчетов в данном разделе нет.

РАЗДЕЛ 7В: СПЕЦИФИКАЦИИ СЛУЖБ СТАНДАРТНЫХ ЧАСТОТ И СИГНАЛОВ ВРЕМЕНИ

Отчетов в данном разделе нет.

/ _____

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

РАЗДЕЛ 7С: СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ И СРАВНЕНИЯ

ОТЧЕТ 267-7

СТАНДАРТНЫЕ ЧАСТОТЫ И СИГНАЛЫ ВРЕМЕНИ

Характеристики излучения стандартных частот и сигналов времени
в распределенных полосах и характеристики передающих станций
со стабилизированными частотами, работающих по регулярным программам
вне распределенных полос частот

(Вопрос 1/7)

(1956—1959—1963—1966—1970—1974—1978—1982—1986—1990)

Характеристики станций, приведенные в нижеследующих таблицах, действительны по состоянию на 16 сентября 1989 года. Для получения информации, касающейся изменений, которые могли произойти с того времени, можно обратиться к Ежегодному отчету отдела времени Международного бюро мер и весов (МБМВ) или же непосредственно обратиться в соответствующий полномочный орган каждой службы, указанный в приложении I.

ТАБЛИЦА I — Характеристики излучения стандартных частот и сигналов времени в распределенных полосах, действительные по состоянию на 16 сентября 1989 г.

Станция			Тип антенн(ы)	Мощность несущих (кВт)	Число одно-времен-ных передач	Период работы		Используемые стандартные частоты		Продолжительность излучения		Неопределенность интервалов частоты и времени частоты и времени ($\times 10^{-10} \times 1$)	Метод индикации DUT1
Позывной сигнал	Расположение	Широта и долгота				Дней в неделю	Часов в день	Несущая частота (МГц)	Модуляция (Гц)	Сигнал времени (мин)	Звуковая модуляция (мин)		
АТА	Нью-Дели, Индия	28° 34' с.ш. 77° 19' в.д.	Горизонтально-свернутый симметричный вибратор	8 (PEP)	3	7	24 ⁽²⁾	5; 10; 15	1; 1000	непрерывный	4/15	±10	
ВРМ ⁽³⁾	Пучинг, Китай	35° 00' с.ш. 109° 31' в.д.	Всенаправленная	10—20	2	7	24 ⁽⁴⁾	2,5; 5; 10; 15	1; 1000	20/30 (UTC) 4/30 (UT1)	нулевая	±10	Прямое излучение сигнала времени UT1
HLA	Тэджон, Научный городок Тэдок, Республика Корея	36° 23' с.ш. 127° 22' в.д.	Вертикальный (конический несимметричный вибратор)	2	1	5 ⁽⁵⁾	7 ⁽⁶⁾	5	1	непрерывный	непрерывная	±10	Код МККР двойной
IAM ⁽⁷⁾	Рим, Италия	41° 47' с.ш. 12° 27' в.д.	Вертикальный четвертьволновый вибратор	1	1	6	2	5	1	непрерывный	нулевая	±10	Код МККР двойной
IBF ⁽⁷⁾	Турин, Италия	45° 02' с.ш. 07° 46' в.д.	Вертикальный четвертьволновый вибратор	5	1	7	2 ³ / ₄	5	1	непрерывный	нулевая	±10	Код МККР двойной
JJY ⁽⁷⁾	Санва, Сасима, Ибараки, Япония	36° 11' с.ш. 139° 51' в.д.	⁽⁸⁾	2	5	7	24 ⁽⁹⁾	2,5; 5; 8; 10; 15	1 ⁽¹⁰⁾ 1000 ⁽¹¹⁾	непрерывный	30/60	±10	Код МККР с удлинением
LOL ⁽⁷⁾	Буэнос-Айрес, Аргентина	34° 37' ю.ш. 58° 21' з.д.	Горизонтальный 3-проводный симметричный вибратор	2	3	7	5	5; 10; 15	1; 440; 1000	непрерывный	3/5	±20	Код МККР с удлинением

ТАБЛИЦА I (продолжение)

Станция			Тип антенн(ы)	Мощность несущих (кВт)	Число одно-временных передач	Период работы		Используемые стандартные частоты		Продолжительность излучения		Неопределенность интервалов частоты и времени $(1 \times 10^{-12})^{(1)}$	Метод индикации DUT1
Позывной сигнал	Расположение	Широта и долгота				Дней в неделю	Часов в день	Несущая частота (МГц)	Модуляция (Гц)	Сигнал времени (мин)	Звуковая модуляция (мин)		
OMA ⁽⁷⁾	Прага, Чехословацкая Социалистическая Республика	50° 07' с.ш. 14° 35' в.д.	Т	1	1	7	24	2,5	1; 1000 ⁽¹²⁾	15/30	4/15	±1000	
RCH ⁽⁷⁾	Ташкент, СССР	41° 19' с.ш. 69° 15' в.д.	Горизонтальный симметричный вибратор	1	2	7	21	2,5; 5; 10	1; 10	40/60	нулевая	±50	Код МККР двойной, дополнительная информация dUT1 ⁽¹³⁾
RID ⁽⁷⁾	Иркутск, СССР	52° 26' с.ш. 104° 02' в.д.	Горизонтальный симметричный вибратор	1 1 1	3	7	24	5,004 10,004 15,004	1; 10	40/60	нулевая	±50	Код МККР двойной, дополнительная информация dUT1 ⁽¹³⁾
RIM ⁽⁷⁾	Ташкент, СССР	41° 19' с.ш. 69° 15' в.д.	Горизонтальный симметричный вибратор	1	1	7	20 ^{1/2}	5; 10	1; 10	39/60	нулевая	±50	Код МККР двойной, дополнительная информация dUT1
RTA ⁽⁷⁾	Новосибирск, СССР	55° 04' с.ш. 82° 58' в.д.	Горизонтальный симметричный вибратор	5	1	7	20 ^{1/2}	10; 15	1; 10	40/60	нулевая	±50	Код МККР двойной, дополнительная информация dUT1 ⁽¹³⁾
RWM ⁽⁷⁾	Москва, СССР	55° 48' с.ш. 38° 18' в.д.	Горизонтальный симметричный вибратор	5 5 8	3	7	24	4,996 9,996 14,996	1; 10	40/60	нулевая	±50	Код МККР двойной, дополнительная информация dUT1 ⁽¹³⁾

ТАБЛИЦА I (продолжение)

Станция			Тип антенн(ы)	Мощность несущих (кВт)	Число одно-времен-ных передач	Период работы		Используемые стандартные частоты		Продолжительность излучения		Неопределенность интервалов частоты и времени $(1 \times 10^{-3})^{(1)}$	Метод индикации DUT1
Позывной сигнал	Расположение	Широта и долгота				Дней в неделю	Часов в день	Несущая частота (МГц)	Модуляция (Гц)	Сигнал времени (мин)	Звуковая модуляция (мин)		
WWV ⁽⁷⁾	Форт-Коллинз, Колорадо, США	40° 41' с.ш. 105° 02' з.д.	Вертикальные полуволновые симметричные вибраторы	2,5—10	5	7	24	2,5; 5; 10; 15; 20 ⁽¹⁴⁾	1; 440; 500; 600	непрерывный ⁽¹⁵⁾	непрерывная ⁽¹⁶⁾	±10	Код МККР двойной, дополнительная информация по UT1 корректировкам
WWVH ⁽⁷⁾	Кааха, Кауаи, Гавайи, США	21° 59' с.ш. 159° 46' з.д.	Вертикальная полуволновая дипольная антенна	2,5—10	4	7	24	2,5; 5; 10; 15 ⁽¹⁴⁾	1; 440; 500; 600	непрерывный ⁽¹⁵⁾	непрерывная ⁽¹⁶⁾	±10	Код МККР двойной, дополнительная информация по UT1 корректировкам
ZLFS	Лоуэр-Хатт, Новая Зеландия	41° 14' ю.ш. 174° 55' в.д.		0,3	1	1	3	2,5	нулевая	нулевой	нулевая	±100	

Примечания к таблице I:

Дневная программа передач и часовая программа модуляции приводятся, в случае необходимости, в виде рис. 1 и 2, дополненных следующими примечаниями:

- (1) Это значение применяется в передатчиках; чтобы получить указанную неопределенность в пункте приема, может потребоваться наблюдение за полученной фазочастотной характеристикой во времени в течение достаточно долгого периода для устранения помех и случайных воздействий.
- (2) 5 МГц: 1800—0900 ч UTC; 10 МГц: 24 часа; 15 МГц: 0900—1800 ч UTC.
- (3) Позывной сигнал азбукой Морзе или речью.
- (4) 2,5 МГц: 0730—0100 ч UTC; 15 МГц: 0100—0900 ч UTC; 5 и 10 МГц: постоянно.
- (5) С понедельника по пятницу (кроме национальных праздников в Корее).
- (6) С 0100 до 0800 ч UTC. Секундные сигналы: 9 периодов модуляции 1800 Гц. Сигналы 59-й и 29-й секунд пропускаются. Час идентифицируется по тональной посылке 1500 Гц длительностью 0,8 с. Начало каждой минуты идентифицируется по тональной посылке 1800 Гц длительностью 0,8 с, речевое объявление часов и минут каждую минуту после сигнала 52-й секунды. Двоично-десятичный код времени (BCD) передается на поднесущей частоте 100 Гц.
- (7) Эти станции сообщили, что они следуют системе UTC, как указано в Рекомендации 460. С 1 января 1972 г. был устранен сдвиг частоты, и сигналы времени остались в пределах 0,8 с UT1 посредством редкого односекундного шага, как было назначено Международным бюро времени.
- (8) Вертикальный четвертьволновый вибратор для 2,5 МГц, горизонтальные полуволновые симметричные вибраторы для 5 и 8 МГц и вертикальные полуволновые симметричные вибраторы для 10 и 15 МГц.
- (9) Прерывается с 35-й по 39-ю минуту каждого часа.
- (10) Секундные сигналы: 8 периодов тональной посылки 600 Гц. Началу каждой минуты предшествует 655 мс тональной посылки 600 Гц.
- (11) Модуляция тональной посылки 1000 Гц между минутами 0—5, 10—15, 20—25, 30—35, 40—45, 50—55, кроме 40 мс до и после каждого секундного сигнала.
- (12) В период с 1800 до 0600 ч UTC звуочастотная модуляция заменяется сигналами времени.
- (13) Дополнительная информация о величине разности $UT1-UTC$ передается кодом $dUT1$. Она уточняет величину разности $UT1-UTC$ до 0,02 с. Полное значение поправки равно $DUT1 + dUT1$. Положительные значения $dUT1$ передаются путем маркировки p секундных сигналов между 21-й и 24-й секундами минуты, так что $dUT1 = + 0,02 \text{ с} \times p$. Отрицательные значения $dUT1$ передаются путем маркировки q секундных сигналов между 31-й и 34-й секундами минуты, так что $dUT1 = - 0,02 \text{ с} \times q$.
- (14) По состоянию на 1 февраля 1977 г., передачи на 25 МГц из WWV и 20 МГц из WWVH были прерваны, но могут быть возобновлены в более поздние сроки.
- (15) В дополнение к другим сигналам времени и объявлениям времени модифицированный временной код IRIG-H создается 1-секундными импульсами и непрерывно излучается на поднесущей 100 Гц на всех частотах. Полный цикл кода — 1 минута. Поднесущая частота 100 Гц синхронизирована с кодовыми сигналами, так что достигается разрешающая способность 10 мс. Код содержит значения $DUT1$ и информацию UTC о минутах, часах и днях года.
- (16) Исключая периоды речевого объявления и 5-минутный период полужаглушенной работы каждый час.

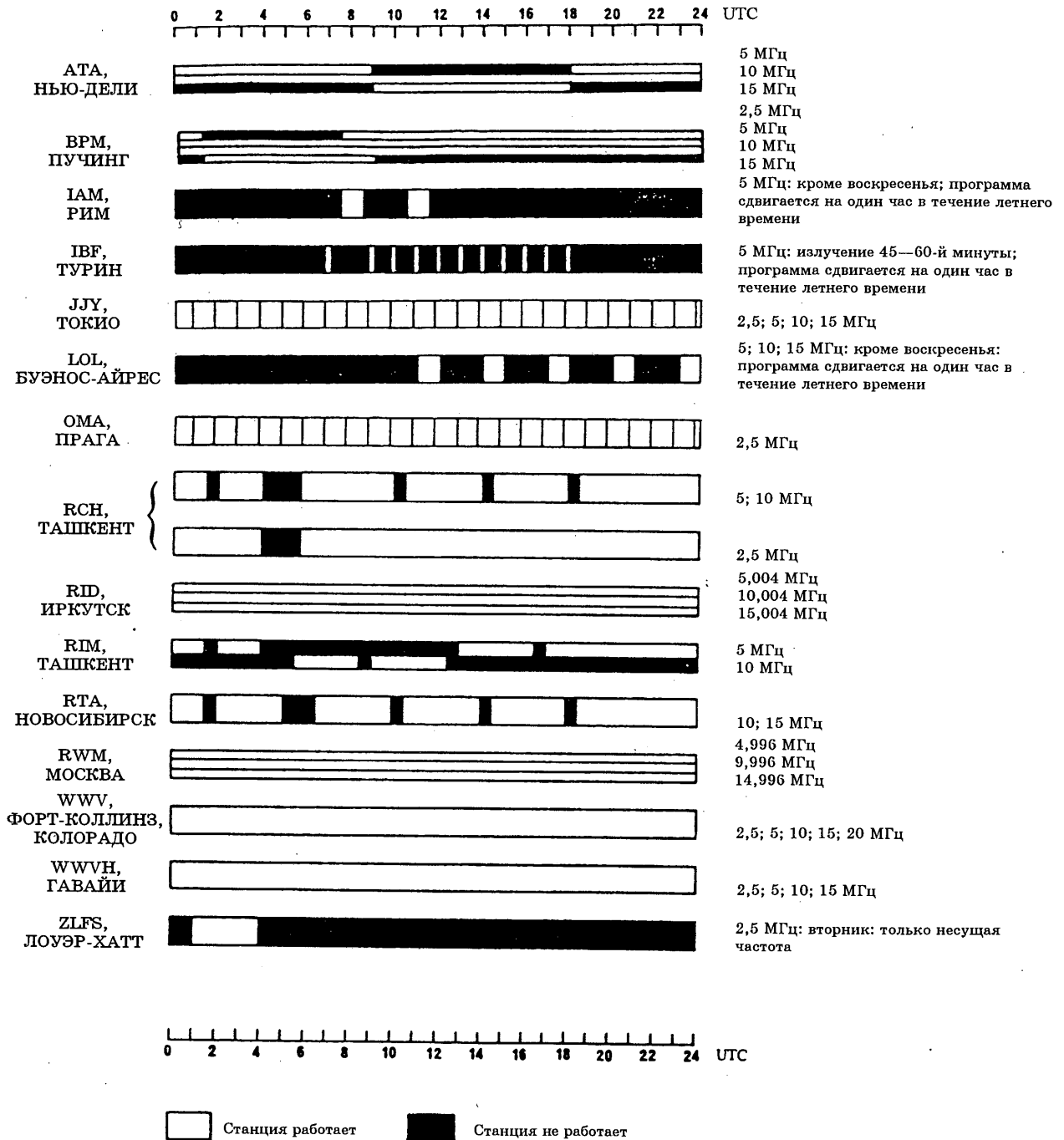
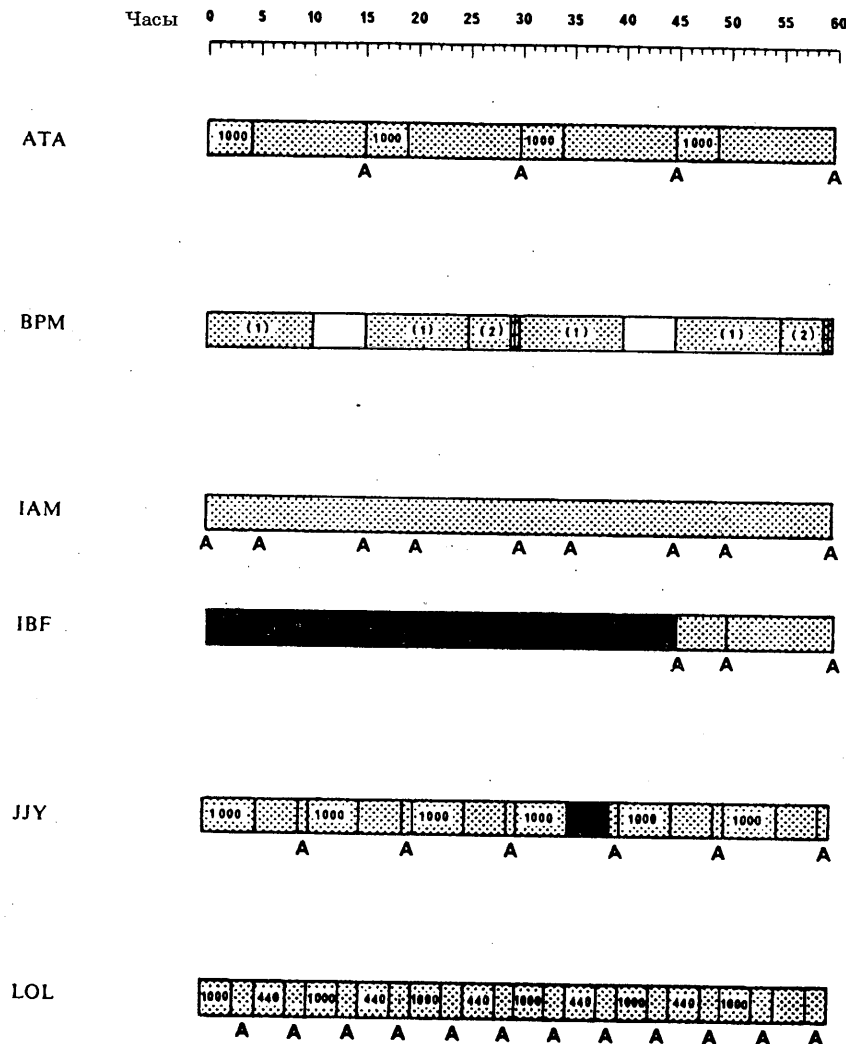


РИСУНОК 1 — Дневная программа работы



Минуты

Форма секундного и минутного сигналов: Морзе или речевое объявление (А).

Сигнал из 5 периодов модуляции тональной посылки 1000 Гц, удлиняемый до 100 мс в начале каждой минуты. Позывной сигнал и время (UTC) — азбукой Морзе.

(1) Сигнал из 10 периодов модуляции тональной посылки 1000 Гц (сигнал времени UTC), первый импульс каждой минуты является 300 мс модуляцией тональной посылки 1000 Гц. Во избежание взаимных помех секундные сигналы UTC BPM опережают сигналы UTC MBV на 20 мс.

(2) 100 мс модуляция тональной посылки 1000 Гц сигнала времени UT1, первый импульс каждой минуты является 300 мс модуляцией тональной посылки 1000 Гц.

Секунды: 5 периодов модуляции тональной посылки 1000 Гц; минутные сигналы: 20 периодов модуляции тональной посылки 1000 Гц. Позывной сигнал и время (UTC) передаются азбукой Морзе и голосом (звуковая идентификация).

Сигналы из 5 периодов модуляции тональной посылки 1000 Гц повторяются 7 раз в минуту. Позывной сигнал и время (UTC) передаются азбукой Морзе, звуковая идентификация — в начале и в конце передачи.

Секундный сигнал: 8 периодов модуляции тональной посылки 1600 Гц; минутным сигналам предшествует тональная посылка 600 Гц длительностью 655 мс. Позывной сигнал и время (JST) передаются азбукой Морзе и голосом. Передаваемые по радио предупреждения в буквенном коде: N (нормально), U (нестабильно), W (помехи). DUT1 указывается числом и позицией секундных сигналов длительностью 45 мс вместо обычной длительности 5 мс.

Сигнал из 5 периодов модуляции тональной посылки 1000 Гц, сигнал 59-й секунды пропускается. Позывной сигнал передается азбукой Морзе; идентификация и время (UTC-3 ч) — голосом.

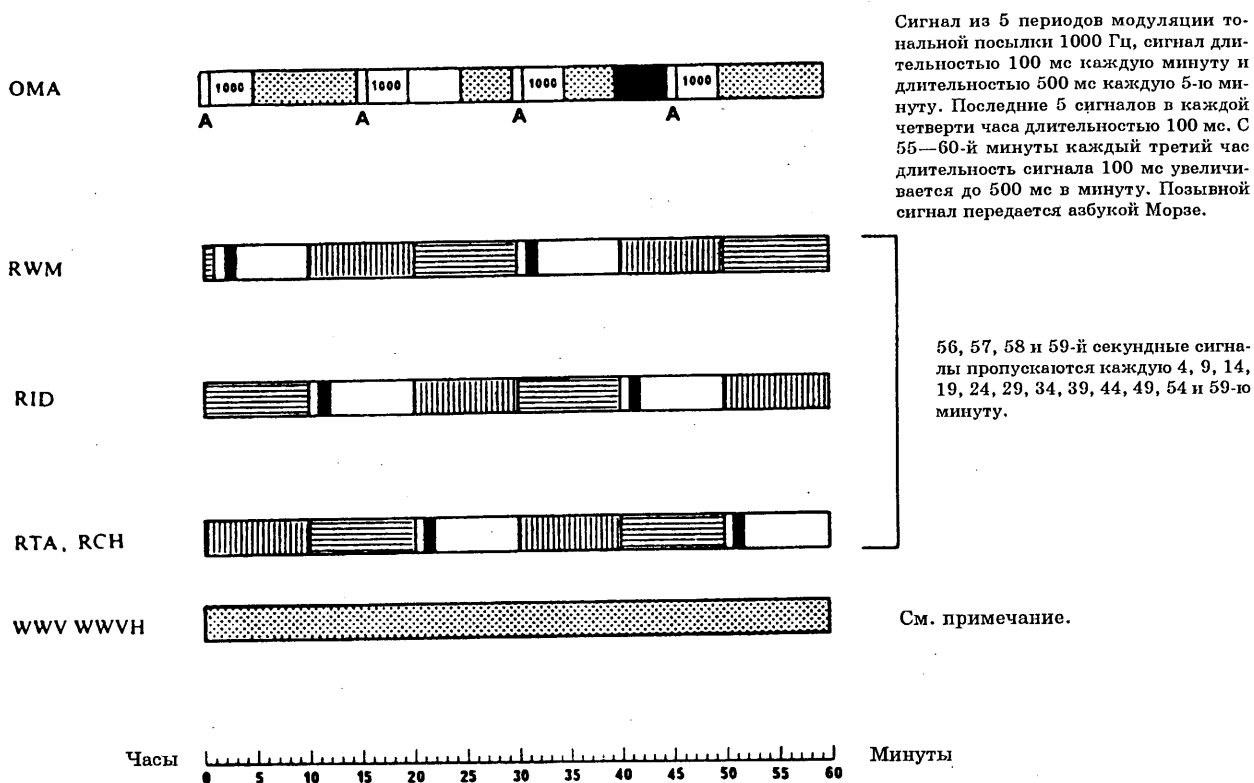


РИСУНОК 2 — Часовые программы модуляции

Примечание. — Сигналы из 5 периодов модуляции тональной посылки 1000 Гц (WWV) или 6 периодов тональной посылки 1200 Гц (WWVH) удлиняются до 0,8 с в начале каждой минуты. С сигнала 1500 Гц длительностью 0,8 с начинается каждый час на обеих станциях. Пропускаются 29-я и 59-я секундные метки каждой минуты. Речевое объявление времени предваряет каждую минуту. 45-секундные звуковые тональные посылки чередуются между 500 и 600 Гц каждую минуту, кроме специальных объявлений или идентификационных сообщений станций, передаваемых голосом. Единичный 45-секундный сегмент 440 Гц включен в каждый час на одну (WWVH) или две (WWV) минуты после часа. Модифицированный код времени IRIG-H, указывающий информацию о дне, часе, минуте и UT1, непрерывно передается на поднесущей частоте 100 Гц. DUT1 информация указывается числом и позицией сдвоенных секундных сигналов каждой минуты. Все модуляции прерываются на 40 мс до и после секундного сигнала.

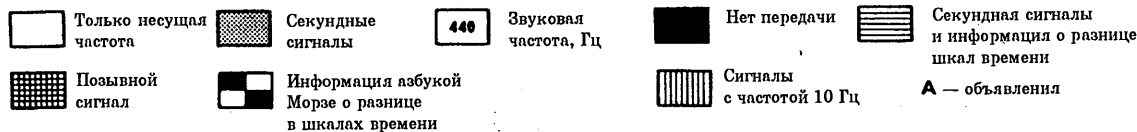


ТАБЛИЦА II — Характеристики излучения стандартных частот и сигналов времени в дополнительных полосах, действительные по состоянию на 16 сентября 1989 г.

Станция			Тип антенн(ы)	Мощность несущих (кВт)	Число одновременных передач	Период работы		Используемые стандартные частоты		Продолжительность излучения		Неопределенность интервалов частоты и времени (1×10^{-12}) (°)	Метод индикации DUT1
Позывной сигнал	Расположение	Широта и долгота				Дней в неделю	Часов в день	Несущая частота (кГц)	Модуляция (Гц)	Сигнал времени (мин)	Звуковая модуляция (мин)		
	Аллуи, Франция	47° 10' с.ш. 02° 12' в.д.	Всенаправленная	1000—2000	1	7	24	162	1 ⁽²⁾	непрерывный	А3Е передается непрерывно	±2	Передачи DUT1 нет
CHU ⁽³⁾	Оттава, Канада	45° 18' с.ш. 75° 45' з.д.	Всенаправленная	3; 10; 3	3	7	24	3330; 7335; 14 670	1 ⁽⁴⁾	непрерывный	нулевая	±5	Код МККР с разделением сигналов
	Донебах, ФРГ	49° 34' с.ш. 09° 11' в.д.	Всенаправленная	250	1	7	24	153	нулевая	нулевой	А3Е передается непрерывно	±2	
DCF77 ⁽³⁾	Майнфлинген, ФРГ	50° 01' с.ш. 09° 00' в.д.	Всенаправленная	20 ⁽⁶⁾	1	7	24	77,5	1	непрерывный ⁽⁶⁾	непрерывная ⁽⁷⁾	±0,5	Передачи DUT1 нет
	Дройтуич, Соединенное Королевство	52° 16' с.ш. 02° 09' з.д.	T	400	1	7	22	198 ⁽⁸⁾	нулевая	нулевой	А3Е передается непрерывно	±20	
	Уэстерглен, Соединенное Королевство	55° 58' с.ш. 03° 50' з.д.	T	50	1	7	22	198 ⁽⁸⁾	нулевая	нулевой	А3Е передается непрерывно	±20	
	Бергхед, Соединенное Королевство	57° 42' с.ш. 03° 28' з.д.	T	50	1	7	22	198 ⁽⁸⁾	нулевая	нулевой	А3Е передается непрерывно	±20	
GBR ⁽³⁾ ⁽⁹⁾ ⁽¹⁰⁾	Рагби, Соединенное Королевство	52° 22' с.ш. 01° 11' з.д.	Всенаправленная	750 60 ⁽⁵⁾	1	7	22 ⁽¹¹⁾	16,0	нулевая	нулевой	нулевая	±10	
HBG ⁽¹²⁾	Прангинс, Швейцария	46° 24' с.ш. 06° 15' в.д.	Всенаправленная	20	1	7	24	75	1 ⁽¹³⁾	непрерывный	нулевая	±1	Передачи DUT1 нет

ТАБЛИЦА II (продолжение)

Станция			Тип антенн(ы)	Мощность несущих (кВт)	Число одно-временных передач	Период работы		Используемые стандартные частоты		Продолжительность излучения		Неопределенность интервалов частоты и времени частоты $(1) \times 10^{-6}$	Метод индикации DUT1
Позывной сигнал	Расположение	Широта и долгота				Дней в неделю	Часов в день	Несущая частота (кГц)	Модуляция (Гц)	Сигнал времени (мин)	Звуковая модуляция (мин)		
JJF2 ⁽³⁾ JG2AS	Санва, Сасима, Ибараки, Япония	36° 11' с.ш. 139° 51' в.д.	Всенаправленная	10	1	7	24 ⁽¹⁴⁾	40	1 ⁽¹⁵⁾	непрерывный ⁽¹⁶⁾	нулевая	±10	
MSF	Рагби, Соединенное Королевство	52° 22' с.ш. 01° 11' з.д.	Всенаправленная	25 ⁽⁶⁾	1	7	24 ⁽¹⁷⁾	60	1 ⁽¹⁸⁾	непрерывный	нулевая	±2	Код МККР двойной
	Милан, Италия	45° 20' с.ш. 09° 12' в.д.	Всенаправленная	600	1	7	24	900	нулевая	нулевой	АЗЕ передается непрерывно	±2	
NAA ⁽³⁾ (¹⁰)(¹⁹)	Катлер, Мэн, США	44° 39' с.ш. 67° 17' з.д.	Всенаправленная	1000 ⁽⁵⁾	1	7	24 ⁽²⁰⁾	24,0 ⁽²¹⁾	нулевая	нулевой	нулевая	±10	
NAU ⁽³⁾ (¹⁰)(¹⁹)	Агуада, Пуэрто-Рико	18° 23' с.ш. 67° 11' з.д.	Всенаправленная	100 ⁽²²⁾	1	7	24	28,5	нулевая	нулевой	нулевая	±10	
NTD ⁽³⁾ (¹⁰)(¹⁹)	Йосами, Япония	34° 58' с.ш. 137° 01' в.д.	Всенаправленная	50 ⁽⁵⁾	1	7	24 ⁽²³⁾	17,4	нулевая	нулевой	нулевая	±10	
NLK ⁽³⁾ (¹⁰)(¹⁹)	Джим-Крик, Вашингтон, США	48° 12' с.ш. 121° 55' з.д.	Всенаправленная	125 ⁽⁵⁾	1	7	24 ⁽²⁴⁾	24,8	нулевая	нулевой	нулевая	±10	
NPM ⁽³⁾ (¹⁰)(¹⁹)	Луалуадей, Гавайи, США	21° 25' с.ш. 158° 09' з.д.	Всенаправленная	600 ⁽⁵⁾	1	7	24 ⁽²⁵⁾	23,4	нулевая	нулевой	нулевая	±10	
NSS ⁽³⁾ (¹⁰)(¹⁹)	Аннаполис, Мэриленд, США	38° 59' с.ш. 76° 27' з.д.	Всенаправленная	400 ⁽⁵⁾	1	7	24 ⁽²⁶⁾	21,4	нулевая	нулевой	нулевая	±10	

ТАБЛИЦА II (продолжение)

Станция			Тип антенн(ы)	Мощность несущих (кВт)	Число одно-времен-ных передач	Период работы		Используемые стандартные частоты		Продолжительность излучения		Неопределенность интервалов частоты и времени (1×10^{-12})	Метод индикации DUT1
Позывной сигнал	Расположение	Широта и долгота				Дней в неделю	Часов в день	Несущая частота (кГц)	Модуляция (Гц)	Сигнал времени (мин)	Звуковая модуляция (мин)		
NWC ⁽³⁾ (¹⁰)(¹⁹)	Эксмут, Австралия	21° 49' ю.ш. 114° 10' в.д.	Всенаправлен-ная антенна	1000 ⁽⁵⁾	1	7	24 ⁽²⁷⁾	22,3	нулевая	нулевой	нулевая	±10	
OMA	Подебради, СССР	50° 08' с.ш. 15° 08' в.д.	Т	5	1	7	24	50	1 ⁽²⁸⁾	23 часа в день ⁽²⁹⁾	нулевая	±1000	Передачи DUT1 нет
RBU ⁽³⁾	Москва, СССР	55° 48' с.ш. 38° 18' в.д.	Всенаправ-ленная	10	1	7	24	66 ² /з	10; 100 312; 5	непре-рывный DXXXW ⁽³⁰⁾	непрерыв-ная ⁽³¹⁾	±5	Код МККР двойной ⁽³²⁾
RTZ ⁽³⁾	Иркутск, СССР	52° 26' с.ш. 104° 02' в.д.	Всенаправ-ленная	10	1	7	23	50	1; 10	6/60	нулевая	±5	Код МККР двойной ⁽³²⁾
RW-166	Иркутск, СССР	52° 18' с.ш. 104° 18' в.д.	Всенаправ-ленная	40	1	7	23	198		нулевой	А3Е передается непрерывно	±5	
RW-76	Новосибирск, СССР	55° 04' с.ш. 82° 58' в.д.	Всенаправ-ленная	150	1	7	22	270		нулевой	А3Е передается непрерывно	±5	
SAJ	Стокгольм, Швеция	59° 15' с.ш. 18° 06' в.д.	Всенаправ-ленная	0,02 (эффектив-ная мощность излучения)	1	3 ⁽³³⁾	2 ⁽³⁴⁾	150 000	нулевая	10 ⁽³⁵⁾		±2	
UNW3	Молодечно, СССР	54° 26' с.ш. 26° 48' в.д.	Всенаправ-ленная	—	1	7	2	25,5 25,1 25,0 23,0 20,5	1; 10; 40 ⁽³⁶⁾	40 мин дважды в день ⁽³⁷⁾	нулевая	±10	

ТАБЛИЦА II (продолжение)

Станция			Тип антенн(ы)	Мощность несущих (кВт)	Число одно-временных передач	Период работы		Используемые стандартные частоты		Продолжительность излучения		Неопределенность интервалов частоты и времени $(1 \times 10^{-12})^{\circ}$	Метод индикации DUT1
Позывной сигнал	Расположение	Широта и долгота				Дней в неделю	Часов в день	Несущая частота (кГц)	Модуляция (Гц)	Сигнал времени (мин)	Звуковая модуляция (мин)		
UPD8	Архангельск, СССР	64° 24' с.ш. 41° 32' в.д.	Всенаправленная	—	1	7	2	25,5 25,1 25,0 23,0 20,5	1; 10; 40 ⁽³⁶⁾	40 мин дважды в день ⁽³⁸⁾	нулевая	±10	
UQC3	Хабаровск, СССР	48° 30' с.ш. 134° 51' в.д.	Всенаправленная	300	1	7	2	25,0 25,1 25,5 23,0 20,5	1; 10; 40 ⁽³⁶⁾	40 мин трижды в день ⁽³⁹⁾	нулевая	±10	
-2 USB2	Фрунзе, СССР	43° 04' с.ш. 73° 39' в.д.	Всенаправленная	—	1	7	3	25,5 25,1 25,0 23,0 20,5	1; 10; 40 ⁽³⁶⁾	40 мин трижды в день ⁽⁴⁰⁾	нулевая	±10	
UTR3	Горький, СССР	56° 11' с.ш. 43° 58' в.д.	Всенаправленная	300	1	7	2	25,0 25,1 25,5 23,0 20,5	1; 10; 40 ⁽³⁶⁾	40 мин трижды в день ⁽⁴¹⁾	нулевая	±10	
VNG ⁽³⁾	Линдхерст, Виктория, Австралия	38° 03' ю.ш. 145° 16' в.д.	Всенаправленная	10	2	7	24 ⁽⁴²⁾	4500 7500 12 000	1; 1000 ⁽⁴³⁾	непрерывный	нулевая	±100	Код МККР двойной, 45 периодов модуляции 900 Гц сразу после стандартного маркера секунды
WWVB ⁽³⁾	Форт-Коллинз, Колорадо, США	40° 40' с.ш. 105° 03' з.д.	Вертикальная, нагруженная вверх антенна	13 ⁽⁶⁾	1	7	24	60	1 ⁽⁴⁴⁾	непрерывный	нулевая	±10	Код МККР отсутствует

ТАБЛИЦА II (продолжение)

Станция			Тип антенн(ы)	Мощность несущих (кВт)	Число одно-временных передач	Период работы		Используемые стандартные частоты		Продолжительность излучения		Неопределенность интервалов частоты и времени (1×10^{-5}) ⁽⁴⁾	Метод индикации DUT1
Позывной сигнал	Расположение	Широта и долгота				Дней в неделю	Часов в день	Несущая частота (кГц)	Модуляция (Гц)	Сигнал времени (мин)	Звуковая модуляция (мин)		
Y3S	Науэн, ГДР	52° 39' с.ш. 12° 55' в.д.	Всенаправленная	5	1	7	24	4525	нулевая	непрерывный ⁽⁴⁵⁾	непрерывная	⁽⁸⁾	Код МККР с разделением сигналов
	Мотала, Швеция	58° 26' с.ш. 14° 59' в.д.	Всенаправленная	300	1	7	17	189	нулевая	21 с один раз в день ⁽⁴⁶⁾	А3Е передается непрерывно	± 50 ⁽⁸⁾	Код МККР с пониженной тональной модуляцией Код МККР двойной
EBC	Сан-Фернандо, Кадис, Испания	36° 28' с.ш. 06° 12' з.д.	Всенаправленная	1	1	7	1	12008 6840	⁽⁴⁷⁾	10	⁽⁴⁸⁾	± 100	

Примечания к таблице II:

- (¹) Это значение применяется в передатчиках; чтобы получить указанную неопределенность в пункте приема, может потребоваться наблюдение за полученной фазочастотной характеристикой во времени в течение достаточно долгого периода для устранения помех и случайных воздействий.
- (²) Фазовая модуляция несущей частоты путем прибавления и вычитания 1 радиана в 0,1 с каждую секунду, кроме 59-й секунды каждой минуты. Эта модуляция двояка для указания двоичной единицы. Число минут, часов, номер дня месяца, дня недели, месяца и года передаются каждую минуту с 21-й по 58-ю секунду, в соответствии с французской узаконенной шкалой времени. Кроме того, двоичная единица на 17-й секунде указывает на то, что местное время опережает UTC на 2 часа (летнее время), а двоичная единица на 18-й секунде — что местное время опережает UTC на 1 час (зимнее время); двоичная единица на 14-й секунде указывает, что текущий день является кануном общенародного праздника (Рождество, 14 июля и т. д.), а двоичная единица на 13-й секунде — что текущий день является кануном общенародного праздника.
- (³) Эти станции сообщили, что они следуют одной из систем, указанных в Рекомендации 460.
- (⁴) Секундные сигналы: 300 периодов тональной посылки 1000 Гц; первый сигнал каждой минуты продлевается.
- (⁵) Цифры показывают расчетную *излучаемую* мощность.
- (⁶) В начале каждой секунды (исключая 59-ю секунду) амплитуда несущей частоты понижается до 25% на 0,1 или 0,2 секунды, соответствующие «двоичному нулю» и «двоичной единице». Число минут, часов, номер дня месяца, дня недели, месяца и года передаются кодом BCD с 21-й по 58-ю секунду. Сигналы времени генерируются в Федеральном физико-техническом институте (PTB) и соответствуют узаконенному времени ФРГ, которое равно UTC (PTB) + 1 ч (центральноевропейское время (CET)) или UTC (PTB) + 2 ч (центральноевропейское летнее время (CEST)). Кроме того, CET и CEST указываются двоичной единицей на 18-й или 17-й секунде, соответственно. Для обеспечения более точной передачи времени и более эффективного использования имеющегося частотного спектра возможно наложение добавочной псевдослучайной фазовой манипуляции на АМ маркеры секунды.
- (⁷) Позывной сигнал дается модуляцией несущей с частотой 250 Гц тональной посылки трижды в час в 19-ю, 39-ю и 59-ю минуты без прерывания последовательности сигналов времени.
- (⁸) Между несущей частотой и сигналами времени нет когерентности.
- (⁹) Используется частотная манипуляция (FSM) альтернативно с несущей, обе несущие частоты контролируются.
- (¹⁰) Используется манипуляция минимальным фазовым сдвигом (MSK): несущая со стабильной фазой может быть восстановлена после соответствующего умножения и преобразования в приемнике. Необходимо напомнить, что использование манипуляции минимальным фазовым сдвигом означает, что ни одна дискретная составляющая не присутствует в соответствующих несущих частотах, приведенных в таблице. Сигнал MSK может быть выражен, как в [Pasupathy, 1979]:

$$S(t) = \cos(2\pi f_c t + a_n(\pi t/2T) + \varphi_n),$$

где $a_n = i(-1)$ для метки (интервала) и $\varphi_n = 0, \pi$ (модуль 2π).

Если передача используется как эталон частоты, необходимо восстановить когерентную по фазе несущую, «освободив» ее от $\pi/2$ приращений, внесенных модуляцией. Существуют два подхода.

Сигнал MSK рассматривается как частотная манипуляция с непрерывной фазой (CPFSK) с индексом модуляции 0,5. Формирование прямоугольных импульсов сигнала и последующая полосовая фильтрация на центральной частоте $2f_c$ обеспечивают формирование сигнала CPFSK со спектральными составляющими на частотах $2f_c + 2f_b$ и $2f_c - 2f_b$, соответствующих метке и интервалу. Составляющие могут быть выделены с помощью двух контуров ФАПЧ и эталонной несущей частоты, полученной умножением, делением и фильтрацией [de Buda, 1972].

При другом подходе сигнал MSK рассматривается как форма фазовой манипуляции (PSK); MSK получается путем преобразований из двоичной PSK (BPSK) или квадратурной PSK (QPSK). Такой способ восстановления несущей, как синфазно-квадратурная схема [Costas-loop], применяемая для PSK, может, таким образом, быть применен и к MSK; такой демодулятор был использован в модели единичной элементарной посылки [Suzuki и др., 1986].

- (¹¹) Период профилактических работ с 1000 до 1400 ч UTC каждый вторник.
- (¹²) Координированные сигналы времени.
- (¹³) Прерывание несущей частоты на 100 мс в начале каждой секунды; двойной сигнал — каждую минуту, тройной сигнал — каждый час, учетверенный сигнал — каждые 12 часов.
- (¹⁴) JF2: телеграф, JG2AS: в отсутствие телеграфных сигналов.

Примечания к таблице II (продолжение):

- (¹⁵) Существуют два типа форматов: первый — передача несущей частоты в течение 500 мс в начале каждой секунды, кроме 59-й секунды, для которой длительность составляет 200 мс, а второй заключается в том, что генерируется медленный временной код (1 бит/с), состоящий из несущих длительностью 500 и 800 мс, соответствующих «двоичной единице» и «двоичному нулю». Продолжительность «позиционной метки» на каждой 9-й секунде и эталонного маркера равна 200 мс. Число минут, часов, дня месяца и сдвиг времени относительно DUT1 передаются кодом BCD с 1-й по 43-ю секунду.
- (¹⁶) В отсутствие телеграфных сигналов.
- (¹⁷) Передача прерывается на период профилактических работ с 1000 до 1400 ч UTC (в первый вторник каждого месяца).
- (¹⁸) Несущая частота прерывается на 100 мс каждую секунду и на 500 мс каждую минуту; быстрый код времени, 100 бит/с, BCD NRZ излучается в течение минутного перерыва, указывая месяц, день месяца, час и минуту. Медленный код времени, 1 бит/с, BCD PWM излучается с 17-й по 51-ю секунду, указывая год, месяц, день месяца, день недели, час и минуту, вместе с 8-битовым идентификатором с 52-й по 59-ю секунду. Код DUT1 МККР двойной.
- (¹⁹) Эти станции главным образом используются для целей связи; хотя эти данные подвержены изменениям, заинтересованные пользователи заранее извещаются об изменениях Военно-морской обсерваторией США, Вашингтон, округ Колумбия, США.
- (²⁰) С 1200 до 2000 ч UTC каждое воскресенье, пока не ведется передача NSS (до 15 июля).
- (²¹) По состоянию на 23 января 1984 г., впредь до дальнейшего уведомления.
- (²²) Введена в эксплуатацию 14 августа 1984 г., 74 кВт.
- (²³) С 2300 до 0900 ч UTC только первые четверг-пятницу, с 2300 до 0700 ч UTC все последующие четверги-пятницы. Половинная мощность с 2200 до 0200 ч UTC каждый понедельник и пятницу.
- (²⁴) Кроме 1600—2400 ч UTC каждый четверг. В течение летнего времени 1500—2300 ч UTC каждый четверг.
- (²⁵) 2,5 мГц: 0000—0100 ч UTC; 5 мГц: 0900—0100 ч UTC; 10 мГц: непрерывно; 15 мГц: 0100—0900 ч UTC.
- (²⁶) Нет передачи до 2100 ч UT 15 июля, за исключением 14 часов каждого воскресенья, охватывающих период, когда не ведется передача NAA.
- (²⁷) С 0000 до 0800 ч, обычно каждый понедельник.
- (²⁸) Телеграфные сигналы A1A.
- (²⁹) С 1000 до 1100 ч UTC передача без манипуляции, за исключением позывных сигналов OMA в начале каждой четверти часа.
- (³⁰) Стандартные частоты и сигналы времени относятся к излучениям типа DXXXW и создаются колебаниями несущей синусоидальных сигналов с частотой $66\frac{2}{3}$ кГц, которые прерываются на 5 мс каждые 100 мс; через 10 мс после прерывания колебания несущей частоты подвергаются узкополосной модуляции по фазе на 80 мс синусоидальными сигналами с поднесущими частотами 100 или 312,5 Гц и индексом модуляции 0,698. Амплитудно-модулированные сигналы с частотой повторения 10 Гц используются для передачи маркеров времени. Сигналы с поднесущей частотой 312,5 Гц используются для указания маркеров секунд и минуты, а также «1» в двоичном коде для передачи информации шкалы времени; сигналы с частотой 100 Гц используются для указания «0» в двоичном коде.
- (³¹) NON сигналы могут быть переданы в индивидуальных случаях.
- (³²) Дополнительная информация о величине разности UT1–UTC передается кодом dUT1. Она уточняет величину разности между UT1–UTC до 0,02 с. Полное значение поправки равно DUT1 + dUT1. Положительные значения dUT1 передаются путем маркировки p секундных сигналов между 21-й и 24-й секундами минуты, так что $dUT1 = +0,02 \times p$. Отрицательные значения dUT1 передаются путем маркировки q секундных сигналов между 31-й и 34-й секундами минуты, так что $dUT1 = -0,02 \times q$.

Примечания к таблице II (продолжение):

- (33) Каждый понедельник, среду и пятницу.
- (34) С 0930 до 1130 ч UTC. В летнее время к данному времени добавляется один час.
- (35) Секундные сигналы: 8 периодов модуляции 1 кГц в течение 5 минут, начиная с 1100 ч UTC и 1125 ч UTC. В летнее время к данным моментам добавляется один час.
- (36) В течение периода работы передается два вида сигналов:
- а) Сигналы A1A с несущей частотой 25 кГц длительностью 0,0125; 0,025; 0,1; 1 и 10 с и периодами повторения 0,025; 0,1; 1; 10 и 60 с, соответственно.
 - б) NON сигналы с несущими частотами 25,0; 25,1; 25,5; 23,0; 20,5 кГц. Фазы этих сигналов согласованы с маркерами времени передаваемой шкалы.
- (37) С 0736 до 1817 ч и 1936 до 2017 ч UTC с 1 октября по 31 марта.
С 0736 до 1817 ч и 2036 до 2117 ч UTC с 1 апреля по 30 сентября.
- (38) С 0836 до 0917 ч и 1136 до 1217 ч UTC.
- (39) С 0036 до 0117 ч, 0636 до 0717 ч и 1736 до 1817 ч UTC с 1 октября по 31 марта.
С 0136 до 0217 ч, 0536 до 0617 ч и 1736 до 1813 ч UTC с 1 апреля по 30 сентября.
- (40) С 0436 до 0517 ч, 0936 до 1017 ч и 2136 до 2217 ч UTC с 1 октября по 31 марта.
С 0436 до 0517 ч, 1036 до 1117 ч и 2236 до 2317 ч UTC с 1 апреля по 30 сентября.
- (41) С 0536 до 0617 ч, 1336 до 1417 ч и 1836 до 1917 ч UTC с 1 октября по 31 марта.
С 0636 до 0717 ч, 1336 до 1417 ч и 1837 до 1917 ч UTC с 1 апреля по 30 сентября.
- (42) 4500 кГц с 0945 до 2130 ч UTC, 12000 кГц с 2145 до 0930 ч UTC, 7500 кГц — непрерывная эксплуатация с техническим перерывом с 2230 до 2245 ч UTC.
- (43) Секундные сигналы из 50 периодов тональной посылки 1000 Гц, укороченные до 5 периодов с 55-й по 58-ю секунду; сигнал 59-й секунды пропускается. На 5, 10, 15-й и т. д. минутах сигналы с 50-й по 58-ю секунду укорочены до 5 периодов; звуковая идентификация между сигналами 20-й и 50-й секунд на 15, 30, 45 и 60-й минутах.
- (44) Используется код времени, уменьшающий несущую на 10 дБ в начале каждой секунды.
- (45) Сигналы времени A1A длительности 0,1 с (маркер минуты длительностью 0,5 с), за которыми следуют кодовые сигналы от 0,25 до 0,3 с для передачи информации о DUT1, DUT1 и времени дня (минута, час) в UTC.
- (46) Сигналы времени A3E длительностью 0,1 с между 11 ч 58 мин 55 с и 11 ч 59 мин 16 с UTC. Длительность маркера минуты составляет 0,5 с. В летнее время к данным моментам добавляется 1 час.
- (47) Секундные сигналы длительностью 0,1 с, модулированные на 1000 Гц.
Минутные сигналы длительностью 0,5 с, модулированные на 1250 Гц.
- (48) Минуты 00—10, 12008 кГц, A2A.
15—25, 12008 кГц, J3E.
30—40, 6840 кГц, A2A.
45—55, 6840 кГц, J3E.

В течение минуты, непосредственно предшествующей каждому указанному периоду, передача позывного сигнала медленным кодом Морзе дважды.

ТАБЛИЦА III — Характеристики некоторых навигационных средств, действительные по состоянию на 16 сентября 1989 г.

Станция			Тип антенн(ы)	Мощность несущих (кВт)	Число одновременных передач	Период работы		Используемые стандартные частоты		Продолжительность излучения		Неопределенность интервалов частоты и времени (1×10^{-12})(¹)
Позывной сигнал	Расположение	Широта и долгота				Дней в неделю	Часов в день	Несущая частота (кГц)	Период следования импульсов (мкс)	Сигнал времени	Звуковая модуляция	
BPL	Пучинг, Китай	34° 56,9' с.ш. 109° 33,1' в.д.	Всенаправленная	800	1	7	8	100	60 000	непрерывный	нулевая	± 1
Loran-C(²) (7980-Z, 9960-Y)	Каролина-Бич Сев.Калифорния, США	34° 03,8' с.ш. 77° 54,8' з.д.	Всенаправленная	550(³)	1	7	24	100	99 600 79 800(⁴)	непрерывный(⁶)	нулевая	± 1
Loran-C (7980-Y)	Юпитер, Флорида, США	27° 02,0' с.ш. 80° 06,9' з.д.	Всенаправленная	325	1	7	24	100	79 800(⁴)	непрерывный(⁶)	нулевая	± 1
Loran-C(²) (5930-Y, 7930-W)	Кэйп-Рэйс, Нью-фаундленд	46° 46,5' с.ш. 53° 10,5' з.д.	Всенаправленная	1500(³)	1	7	24	100	79 300 59 300(⁴)	непрерывный(⁶)	нулевая	± 1
Loran-C(²) (5930-X, 9960-X)	о.Нантакет, США	41° 15,2' с.ш. 69° 58,6' з.д.	Всенаправленная	325(³)	1	7	24	100	59 300(⁴) 99 600	непрерывный(⁶)	нулевая	± 1
Loran-C(²) (8970-M, 9960-Z)	Дана, Индиана, США	39° 51,1' с.ш. 87° 29,2' з.д.	Всенаправленная	400(³)	1	7	24	100	89 700(⁴) 99 600	непрерывный(⁶)	нулевая	± 1
Loran-C(²) (7930-X, 9980-W)	Ангиссок, Гренландия	59° 59,3' с.ш. 45° 10,4' з.д.	Всенаправленная	760(³)	1	7	24	100	79 300(⁴)	непрерывный(⁶)	нулевая	± 1

ТАБЛИЦА III (продолжение)

Станция			Тип антенн(ы)	Мощность несущих (кВт)	Число одновременных передач	Период работы		Используемые стандартные частоты		Продолжительность излучения		Неопределенность интервалов частоты и времени (1×10^{-12}) ⁽¹⁾
Позывной сигнал	Расположение	Широта и долгота				Дней в неделю	Часов в день	Несущая частота (кГц)	Период следования импульсов (мкс)	Сигнал времени	Звуковая модуляция	
Loran-C ⁽²⁾ (7970-M, 9980-X)	Эйде, Фарерские о-ва	62° 18,0' с.ш. 7° 04,4' з.д.	Всенаправленная	325 ⁽³⁾	1	7	24	100	79 300 79 700 ⁽⁴⁾	непрерывный ⁽⁵⁾	нулевая	± 1
Loran-C (7970-W)	Силт, ФРГ	54° 48,5' с.ш. 8° 17,6' в.д.	Всенаправленная	325 ⁽³⁾	1	7	24	100	79 700 ⁽⁴⁾	непрерывный ⁽⁵⁾	нулевая	± 1
Loran-C (7970-X)	Бо, Норвегия	68° 38,1' с.ш. 14° 27,8' в.д.	Всенаправленная	165 ⁽³⁾	1	7	24	100	79 700 ⁽⁴⁾	непрерывный ⁽⁵⁾	нулевая	± 1
Loran-C ⁽²⁾ (7970-Y, 9980-M)	Сандур, Исландия	64° 54,4' с.ш. 23° 55,4' з.д.	Всенаправленная	1500 ⁽³⁾	1	7	24	100	79 300 ⁽⁴⁾	непрерывный ⁽⁵⁾	нулевая	± 1
Loran-C (7970-Z)	Ян-Майен, Норвегия	70° 54,9' с.ш. 8° 44,0' з.д.	Всенаправленная	165 ⁽³⁾	1	7	24	100	79 700 ⁽⁴⁾	непрерывный ⁽⁵⁾	нулевая	± 1
Loran-C (5930-Z, 7930-M)	Фокс-Харбор, Канада	52° 22,6' с.ш. 55° 42,5' з.д.	Всенаправленная	800 ⁽³⁾	1	7	24	100	59 300 79 300	непрерывный ⁽⁵⁾	нулевая	± 1
Loran-C (7990-M)	Селлия Марина, Италия	38° 52,3' с.ш. 16° 43,1' в.д.	Всенаправленная	165 ⁽³⁾	1	7	24	100	79 900 ⁽⁴⁾	непрерывный ⁽⁵⁾	нулевая	± 1
Loran-C (7990-X)	Лампедуза, Италия	35° 31,3' с.ш. 12° 31,5' в.д.	Всенаправленная	325 ⁽³⁾	1	7	24	100	79 900 ⁽⁴⁾	непрерывный ⁽⁵⁾	нулевая	± 1
Loran-C (7990-Y)	Каргабарун, Турция	40° 58,3' с.ш. 27° 52,0' в.д.	Всенаправленная	165 ⁽³⁾	1	7	24	100	79 900 ⁽⁴⁾	непрерывный ⁽⁵⁾	нулевая	± 1

ТАБЛИЦА III (продолжение)

Станция			Тип антенн(ы)	Мощность несущих (кВт)	Число одновре- менных передач	Период работы		Используемые стандартные частоты		Продолжительность излучения		Неопределен- ность интервалов частоты и времени (1×10^{-12}) ⁽¹⁾
Позывной сигнал	Расположение	Широта и долгота				Дней в неделю	Часов в день	Несущая частота (кГц)	Период следования импульсов (мкс)	Сигнал времени	Звуковая модуляция	
Loran-C (7990-Z)	Эстартит, Испания	42° 03,6' с.ш. 3° 12,3' в.д.	Всенаправ- ленная	165 ⁽³⁾	1	7	24	100	79 900 ⁽⁴⁾	непрерывный ⁽⁵⁾	нулевая	± 1
Loran-C (4990-M)	о.Джонстона	16° 44,7' с.ш. 169° 30,5' з.д.	Всенаправ- ленная	325 ⁽³⁾	1	7	24	100	49 900 ⁽⁴⁾	непрерывный ⁽⁵⁾	нулевая	± 1
Loran-C (4990-X)	Уполу-Пойнт, Гавайи, США	20° 14,8' с.ш. 155° 53,2' з.д.	Всенаправ- ленная	325 ⁽³⁾	1	7	24	100	49 900 ⁽⁴⁾	непрерывный ⁽⁵⁾	нулевая	± 1
Loran-C (4990-Y)	Кьюэр, Гавайи, США	28° 23,7' с.ш. 178° 17,5' з.д.	Всенаправ- ленная	325 ⁽³⁾	1	7	24	100	49 900 ⁽⁴⁾	непрерывный ⁽⁵⁾	нулевая	± 1
Loran-C (9970-M)	Иво Йима, Япония	24° 48,1' с.ш. 141° 19,5' в.д.	Всенаправ- ленная	1815 ⁽³⁾	1	7	24	100	99 700 ⁽⁴⁾	непрерывный ⁽⁵⁾	нулевая	± 1
Loran-C (9970-W, 7930-M)	Минами, Тори Сима (о.Маркуса), Япония	24° 17,1' с.ш. 153° 58,9' в.д.	Всенаправ- ленная	2160 ⁽³⁾	1	7	24	100	99 700 ⁽⁴⁾	непрерывный ⁽⁵⁾	нулевая	± 1
Loran-C (9970-X, 7930-X, 5970-W)	Хоккайдо, Япония	42° 44,6' с.ш. 143° 43,2' в.д.	Всенаправ- ленная	1000 ⁽³⁾	1	7	24	100	99 700 ⁽⁴⁾ 79 300 59 700	непрерывный ⁽⁵⁾	нулевая	± 1
Loran-C (9970-Y, 7930-Y, 5970-Z)	Гесаси, Окинава, Япония	26° 36,4' с.ш. 128° 08,9' в.д.	Всенаправ- ленная	1000 ⁽³⁾	1	7	24	100	99 700 ⁽⁴⁾ 79 300 59 700	непрерывный ⁽⁵⁾	нулевая	± 1
Loran-C (7930-Z)	Ял, о.Каролина	9° 32,8' с.ш. 138° 09,9' в.д.	Всенаправ- ленная	1000 ⁽³⁾	1	7	24	100	79 300 ⁽⁴⁾	непрерывный ⁽⁵⁾	нулевая	± 1

ТАБЛИЦА III (продолжение)

Станция			Тип антенн(ы)	Мощность несущих (кВт)	Число одновременных передач	Период работы		Используемые стандартные частоты		Продолжительность излучения		Неопределенность интервалов частоты и времени (1×10^{-12}) ⁽¹⁾
Позывной сигнал	Расположение	Широта и долгота				Дней в неделю	Часов в день	Несущая частота (кГц)	Период следования импульсов (мкс)	Сигнал времени	Звуковая модуляция	
Loran-C (9990-M)	о.Св. Павла, о-ва Прибылова, Аляска	59° 09,2' с.ш. 170° 15,1' з.д.	Всенаправленная	325 ⁽³⁾	1	7	24	100	99 900 ⁽⁴⁾	непрерывный ⁽⁶⁾	нулевая	± 1
Loran-C (9990-X)	Атту, Аляска	52° 49,7' с.ш. 173° 10,8' в.д.	Всенаправленная	325 ⁽³⁾	1	7	24	100	99 900 ⁽⁴⁾	непрерывный ⁽⁶⁾	нулевая	± 1
Loran-C ⁽²⁾ (9960-M, 8970-X)	Сенека, Нью-Йорк, США	42° 42,8' с.ш. 76° 49,6' з.д.	Всенаправленная	800 ⁽³⁾	1	7	24	100	99 600 ⁽⁴⁾ 89 700 ⁽⁴⁾	непрерывный ⁽⁶⁾	нулевая	± 1
Loran-C ⁽²⁾ (9960-W, 5930-M)	Карибу, Мэн, США	46° 48,5' с.ш. 67° 55,6' з.д.	Всенаправленная	350 ⁽³⁾	1	7	24	100	59 300 ⁽⁴⁾ 99 600 ⁽⁴⁾	непрерывный ⁽⁶⁾	нулевая	± 1
Loran-C ⁽²⁾ (8970-W, 7980-M)	Мэлон, Флорида, США	30° 59,6' с.ш. 85° 10,1' з.д.	Всенаправленная	800 ⁽³⁾	1	7	24	100	89 700 ⁽⁴⁾ 79 800 ⁽⁴⁾	непрерывный ⁽⁶⁾	нулевая	± 1
Loran-C (8970-Y)	Баудетт, Миннесота, США	48° 36,8' с.ш. 94° 33,3' з.д.	Всенаправленная	800 ⁽³⁾	1	7	24	100	89 700 ⁽⁴⁾	непрерывный ⁽⁶⁾	нулевая	± 1
Loran-C (7980-W)	Гранжвилл, Луизиана, США	30° 43,6' с.ш. 90° 49,7' з.д.	Всенаправленная	800 ⁽³⁾	1	7	24	100	79 800 ⁽⁴⁾	непрерывный ⁽⁶⁾	нулевая	± 1
Loran-C (7980-X)	Реймондвилл, Техас, США	26° 31,9' с.ш. 97° 50,0' з.д.	Всенаправленная	400 ⁽³⁾	1	7	24	100	79 800 ⁽⁴⁾	непрерывный ⁽⁶⁾	нулевая	± 1

ТАБЛИЦА III (продолжение)

Станция			Тип антенн(ы)	Мощность несущих (кВт)	Число одновременных передач	Период работы		Используемые стандартные частоты		Продолжительность излучения		Неопределенность интервалов частоты и времени (1×10^{-12}) ⁽¹⁾
Позывной сигнал	Расположение	Широта и долгота				Дней в неделю	Часов в день	Несущая частота (кГц)	Период следования импульсов (мкс)	Сигнал времени	Звуковая модуляция	
Loran-C (9990-Y)	Пойнт-Кларенс, Аляска	65° 14,7' с.ш. 166° 53,2' з.д.	Всенаправленная	1000 ⁽³⁾	1	7	24	100	99 900 ⁽⁴⁾	непрерывный ⁽⁵⁾	нулевая	± 1
Loran-C ⁽²⁾ (9990-Z, 7960-X)	Нэрроу-Кейп, Аляска	57° 26,3' с.ш. 152° 22,2' з.д.	Всенаправленная	400 ⁽³⁾	1	7	24	100	99 900 79 600 ⁽⁴⁾	непрерывный ⁽⁵⁾	нулевая	± 1
Loran-C (7960-M)	Ток, Аляска	63° 19,7' с.ш. 142° 48,5' з.д.	Всенаправленная	540 ⁽³⁾	1	7	24	100	79 600 ⁽⁴⁾	непрерывный ⁽⁵⁾	нулевая	± 1
Loran-C ⁽²⁾ (7960-Y, 5990-X)	Шоал-Коув, Аляска	55° 26,3' с.ш. 131° 15,3' з.д.	Всенаправленная	540 ⁽³⁾	1	7	24	100	79 600 59 900 ⁽⁴⁾	непрерывный ⁽⁵⁾	нулевая	± 1
Loran-C (5990-M)	Уильямс-Лейк, Британская Колумбия, Канада	51° 58,0' с.ш. 122° 22,0' з.д.	Всенаправленная	400 ⁽³⁾	1	7	24	100	59 900 ⁽⁴⁾	непрерывный ⁽⁵⁾	нулевая	± 1
Loran-C ⁽²⁾ ((5990-Y, 9940-W)	Джордж, Вашингтон, США	47° 03,8' с.ш. 119° 44,8' з.д.	Всенаправленная	1600 ⁽³⁾	1	7	24	100	59 900 99 400 ⁽⁴⁾	непрерывный ⁽⁵⁾	нулевая	± 1
Loran-C (9940-M)	Фаллон, Невада, США	39° 33,1' с.ш. 118° 49,9' з.д.	Всенаправленная	400 ⁽³⁾	1	7	24	100	99 400 ⁽⁴⁾	непрерывный ⁽⁵⁾	нулевая	± 1
Loran-C (9940-X)	Миддлтаун, Калифорния, США	38° 46,9' с.ш. 122° 29,7' з.д.	Всенаправленная	400 ⁽³⁾	1	7	24	100	99 400 ⁽⁴⁾	непрерывный ⁽⁵⁾	нулевая	± 1

ТАБЛИЦА III (продолжение)

Станция			Тип антенн(ы)	Мощность несущих (кВт)	Число одновременных передач	Период работы		Используемые стандартные частоты		Продолжительность излучения		Неопределенность интервалов частоты и времени (1×10^{-12}) ⁽¹⁾
Позывной сигнал	Расположение	Широта и долгота				Дней в неделю	Часов в день	Несущая частота (кГц)	Период следования импульсов (мкс)	Сигнал времени	Звуковая модуляция	
Loran-C (9940-Y)	Серчлайт, Невада, США	35° 19,3' с.ш. 114° 48,3' з.д.	Всенаправленная	540 ⁽³⁾	1	7	24	100	99 400 ⁽⁴⁾	непрерывный ⁽⁵⁾	нулевая	± 1
Loran-C (5990-Z)	Порт-Харди, Британская Колумбия, Канада	50° 36,5' с.ш. 127° 21,5' з.д.	Всенаправленная	400 ⁽³⁾	1	7	24	100	59 900 ⁽⁴⁾	непрерывный	нулевая	± 1
RNS-E(A)	Брянск, СССР	53° 13' с.ш. 34° 24' в.д.	Всенаправленная	800 ⁽³⁾	1	7 ⁽⁶⁾	10 ⁽⁷⁾	100	80 000 ⁽⁸⁾	непрерывный	нулевая	± 5
RNS-E(D)	Сызрань, СССР	53° 11' с.ш. 49° 46' в.д.	Всенаправленная	800 ⁽³⁾	1	6 ⁽⁶⁾	10 ⁽⁷⁾	100	80 000 ⁽⁸⁾	⁽⁹⁾	нулевая	± 5
RNS-W (A)	Александровск-Сахалинский, СССР	50° 56' с.ш. 142° 38' в.д.	Всенаправленная	400 ⁽³⁾	1	7 ⁽¹⁾	12 ⁽¹⁰⁾	100	50 000 ⁽⁸⁾	непрерывный	нулевая	± 5
Omega Ω/A	Альдра, Норвегия	66° 25' с.ш. 13° 08' в.д.	Всенаправленная	10 ⁽¹¹⁾	1	7	24	11,05-F 10,2-A ⁽¹²⁾ 11 ¹ / ₃ -C 13,6-B	нулевой	⁽¹²⁾	нулевая	± 5
Omega Ω/B	Монровия, Либерия	06° 18' с.ш. 10° 40' з.д.	Всенаправленная	10 ⁽¹¹⁾	1	7	24	11,05-G 10,2-B ⁽¹²⁾ 11 ¹ / ₃ -D 13,6-C	нулевой	⁽¹²⁾		± 1

ТАБЛИЦА III (продолжение)

Станция			Тип антенн(ы)	Мощность несущих (кВт)	Число одновременных передач	Период работы		Используемые стандартные частоты		Продолжительность излучения		Неопределенность интервалов частоты и времени (1×10^{-12}) ⁽¹⁾
Позывной сигнал	Расположение	Широта и долгота				Дней в неделю	Часов в день	Несущая частота (кГц)	Период следования импульсов (мкс)	Сигнал времени	Звуковая модуляция	
Omega Ω/C	Хайку, Гавайи, США	21° 24' с.ш. 157° 50' з.д.	Всенаправ- ленная	10 ⁽¹¹⁾	1	7	24	11,05-Н 10,2-С ⁽¹²⁾ 11 ¹ / ₃ -Е 13,6-D	нулевой	⁽¹²⁾	нулевая	± 1
Omega Ω/D	Ламур, Северная Дакота, США	46° 22' с.ш. 98° 20' з.д.	Всенаправ- ленная	10 ⁽¹¹⁾	1	7	24	11,05-A 10,2-D ⁽¹²⁾ 11 ¹ / ₃ -F 13,6-E	нулевой	⁽¹²⁾	нулевая	± 1
Omega Ω/E	Реюньон	20° 58' ю.ш. 55° 17' в.д.	Всенаправ- ленная	10 ⁽¹¹⁾	1	7	24	11,05-B 10,2-E ⁽¹²⁾ 11 ¹ / ₃ -G 13,6-F	нулевой	⁽¹²⁾	нулевая	± 1
Omega Ω/F	Голфо-Нуэво, Аргентина	43° 03' ю.ш. 65° 11' з.д.	Всенаправ- ленная	10 ⁽¹¹⁾	1	7	24	11,05-C 10,2-F ⁽¹²⁾ 11 ¹ / ₃ -H 13,6-G	нулевой	⁽¹²⁾	нулевая	± 1
Omega Ω/G	Вудсайд, Виктория, Австралия	38° 29' ю.ш. 146° 56' в.д.	Всенаправ- ленная	10 ⁽¹¹⁾	1	7	24	11,05-D 10,2-G 11 ¹ / ₃ -A 13,6-H	нулевой	⁽¹²⁾	нулевая	± 1
Omega Ω/H	о-ва Цусима, Япония	34° 37' с.ш. 129° 27' в.д.	Всенаправ- ленная	10 ⁽¹¹⁾	1	7	24	11,05-E 10,2-Н ⁽¹²⁾ 11 ¹ / ₃ -B 13,6-A	нулевой	⁽¹²⁾	нулевая	± 1

Примечания к таблице III:

- (¹) 20-го и 21-го числа каждого месяца передачи отсутствуют.
- (²) Станция с двумя номинальными мощностями.
- (³) Максимальная излучаемая мощность.
- (⁴) Сигналы времени появляются в группах из 9 импульсов для главных станций (М) и в группах из 8 — для ведомых станций (W, X, Y, Z).
- (⁵) Поддерживается в пределах ± 5 мкс UTC. Время совпадения пакетов (ТОС) с секундой UTC меняется с появлением дополнительных секунд и публикуется в ТОС-таблицах, выпускаемых для заинтересованных пользователей Военно-морской обсерваторией США, Вашингтон, округ Колумбия, США.
- (⁶) 10-го и 11-го числа каждого месяца передачи отсутствуют.
- (⁷) С 0400 до 1000 ч и 1400 до 1800 ч UTC.
- (⁸) Сигналы ведущих станций (А) маркируются передачей дополнительного 9-го импульса в каждой группе. Каждая группа импульсов, совпадающая с маркером секунды UTC, маркируется передачей дополнительного (10-го) импульса. В случае совпадения с маркером минуты дополнительно маркируют следующие 10 групп импульсов, а при совпадении с маркером 5 минут через 12 с также маркируют следующие 11 групп импульсов. Маркеры секунды UTC совмещены с характерными точками, расположенными во фронтах восьмых импульсов на уровне 0,6 максимальной величины сигнала.
- (⁹) Обычно работает без маркера секунды. В отдельных случаях работает с маркером секунды, сдвинутым относительно UTC.
- (¹⁰) С 2300 до 2400 ч и 0000 до 1100 ч UTC.
- (¹¹) Цифры показывают приблизительную излучаемую мощность.
- (¹²) См. таблицу IV.

ТАБЛИЦА IV — Формат сигналов станций OMEGA

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Сегмент	A	B	C	D	E	F	G	H			
Продолжительность	0,9	1,0	1,1	1,2	1,1	0,9	1,2	1,0			
кГц:											
10,2	Норвегия	Либерия	Гавайи	Северная Дакота	Реюньон	Аргентина	Австралия	Япония			
11 ¹ / ₃	Австралия	Япония	Норвегия	Либерия	Гавайи	Северная Дакота	Реюньон	Аргентина			
13,6	Япония	Норвегия	Либерия	Гавайи	Северная Дакота	Реюньон	Аргентина	Австралия			
11,05	Северная Дакота	Реюньон	Аргентина	Австралия	Япония	Норвегия	Либерия	Гавайи			

Примечание 1. — Сегмент А не начинается от 0,0 с UTC. Время сегментов изменяется с появлением дополнительных секунд. Сегмент А начинается от секунды 45,0 в январе 1990 г.

Примечание 2. — Станции OMEGA используются для общих навигационных целей; хотя эти данные подвержены изменениям, заинтересованные пользователи заранее извещаются обо всех изменениях Комендатурой береговой охраны США.*

Примечание 3. — В дополнение к навигационным частотам 10,2, 13,6 и 11¹/₃ кГц, передаваемым всеми станциями, станции передают «уникальные частоты». Эти станции и их частоты/сегменты приведены в таблице V.

* Комендатура береговой охраны США (G-WAN-3/73), 400 Seventh Street, S.W., Washington, DC 20590.

ТАБЛИЦА V — Передающий сигнальный формат радионавигационной системы OMEGA

Станция \ Сегмент	1	2	3	4	5	6	7	8								
Норвегия (А)	10,2	13,6	11 1/3	12,1 ⁽¹⁾	12,1 ⁽¹⁾	11,05	12,1 ⁽¹⁾	12,1 ⁽¹⁾								
Либерия (В)	12,0 ⁽¹⁾	10,2	13,6	11 1/3	12,0 ⁽¹⁾	12,0 ⁽¹⁾	11,05	12,0 ⁽¹⁾								
Гавайи (С)	11,8 ⁽¹⁾	11,8 ⁽¹⁾	10,2	13,6	11 1/3	11,8 ⁽¹⁾	11,8 ⁽¹⁾	11,05								
Северная Дакота (D)	11,05	13,1 ⁽¹⁾	13,1 ⁽¹⁾	10,2	13,6	11 1/3	13,1 ⁽¹⁾	13,1 ⁽¹⁾								
Реюньон (Е)	12,3 ⁽¹⁾	11,05	12,3 ⁽¹⁾	12,3 ⁽¹⁾	10,2	13,6	11 1/3	12,3 ⁽¹⁾								
Аргентина (F)	12,9 ⁽¹⁾	12,9 ⁽¹⁾	11,05	12,9 ⁽¹⁾	12,9 ⁽¹⁾	10,2	13,6	11 1/3								
Австралия (G)	11 1/3	13,0 ⁽¹⁾	13,0 ⁽¹⁾	11,05	13,0 ⁽¹⁾	13,0 ⁽¹⁾	10,2	13,6								
Япония (H)	13,6	11 1/3	12,8 ⁽¹⁾	12,8 ⁽¹⁾	11,05	12,8 ⁽¹⁾	12,8 ⁽¹⁾	10,2								
Интервал передачи	0,9	0,2	1,0	0,2	1,1	0,2	1,2	0,2	1,1	0,2	0,9	0,2	1,2	0,2	1,0	0,2
	10 с															

Частоты в кГц.

⁽¹⁾ Уникальная частота для соответствующей станции.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

ПОЛНОМОЧНЫЕ ОРГАНЫ, ОТВЕТСТВЕННЫЕ ЗА СТАНЦИИ, УКАЗАННЫЕ В ТАБЛИЦАХ I И II

<i>Станция</i>	<i>Полномочный орган</i>
Allouis	Centre National d'Études des Télécommunications Département FRE 196, rue de Paris 92220 Bagneux, France
ATA	Time and Frequency Section National Physical Laboratory S.R. Krishnan Road New Delhi-110012, India
BPM	Time and Frequency Division Shaanxi Astronomical Observatory Chinese Academy of Sciences Lintong, Xian, China
CHU	National Research Council Time and Frequency Section Physics Division (m-36) Ottawa K1A 0S1, Ontario, Canada
DCF77	Physikalisch-Technische Bundesanstalt Lab. Zeiteinheit Bundesallee 100 3300 Braunschweig, Federal Republic of Germany
EBC	Instituto y Observatorio de Marina (Spanish Naval Observatory) San Fernando (Cadiz), Spain
GBR	National Physical Laboratory Electrical Science Division Teddington, Middlesex TW11 0LW United Kingdom
HBG	Service horaire HBG Observatoire cantonal CH-2000 — Neuchâtel, Switzerland
HLA	Time and Frequency Laboratory Korea Standards Research Institute P.O. Box 3, Taedok Science Town Taejon, Ch'ungnam 300-31 Republic of Korea
IAM	Istituto Superiore Poste e Telecomunicazioni Viale Europa 00100 — Roma, Italy
IBF	Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris Corso Massimo d'Azeglio, 42 10125 — Torino, Italy

JJY JG2AS	Standards and Measurements Division The Communications Research Laboratory Ministry of Posts and Telecommunications Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184, Japan
LOL	Director Observatorio Naval Av. Costanera Sur, 2099 Buenos Aires, Argentine Republic
MSF	National Physical Laboratory Electrical Science Division Teddington, Middlesex, TW11 OLW, United Kingdom
NAA, NDT, NLK, NPM, NSS, NWC, NMO, NPN	Superintendent US Naval Observatory Washington, DC 20390 USA
OMA	1. Time information: Astronomický ústav CSAV, Budečská 6 12023 Praha 2 Vinohrady, Czechoslovak S.R. 2. Standard frequency information: Ústav radiotechniky a elektroniky CSAV Lumumbova 1 18088 Praha 8, Kobylisy, Czechoslovak S.R.
RAT, RCH, RID, RIM, RWM	Госстандарт, Совет Министров СССР, Москва, СССР, Ленинский просп., 9
SAJ Motala	Swedish Telecommunications Administration Radio Services S-123 86 Farsta, Sweden
VNG	Section Head (Time and Frequency Standards) A.P.O. Research Laboratories 59 Little Collins Street Melbourne, Victoria 3000, Australia
WWV, WWVH WWVB	Time and Frequency Services Group Time and Frequency Division National Institute of Standards and Technology 325 Broadway Boulder, Colorado 80303, USA
Y3S	Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung Fachgebiet Zeit und Frequenz DDR-1162 Berlin Fürstenwalder Damm 388 German Democratic Republic
ZUO	Time Standards Section Precise Physical Measurements Division National Physical Research Laboratory P.O. Box 395 0001 — Pretoria, South Africa

ССЫЛКИ

- DE BUDA, R. [1972] Coherent demodulation of frequency-shift keying with low deviation ratio. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-20, June, 429—435.
- PASUPATHY, S. [1979] Minimum shift keying: a spectrally efficient modulation. *IEEE Comm. Magazine*, July, 14—22.
- SUZUKI, H., YAMAO, Y. and KIKUCHI, H. [1986] A single-chip MSK coherent demodulator for mobile radio transmission. *IEEE Trans. Vehic. Tech.*, Vol. VT-34 (4), 157—168.

ОТЧЕТ 270-3

ОПТИМАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧАСТОТНОГО СПЕКТРА
ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ СИГНАЛОВ ВРЕМЕНИ

(Исследовательская программа 3А/7)

(1963—1966—1970—1978)

Существует все большее число сфер применения, требующих использования высокоточных эталонов для синхронизации сигналов времени. Для достижения большей точности желательно использовать соответствующую ширину полосы частот вплоть до пределов, устанавливаемых с учетом:

- распределения полос частот;
- нестабильности условий распространения;
- проблемы шума и помех.

Кроме того, существуют возможности для распространения и сличения времени путем использования сигналов, передаваемых для других целей, таких как ОНЧ связь, радиовещание и телевидение, или навигационных сигналов. Использование этих сигналов, когда это возможно, способствует сохранению ресурсов как частотного спектра, так и оборудования, а следовательно, должно поощряться, однако этот вопрос далее не рассматривается в настоящем Отчете, за исключением тех случаев, когда особенности излучений позволяют получить неопределенности по времени, значительно меньшие, чем те, которые обычно достигаются в той же полосе частот.

Навигационная система Loran-C, работающая в полосе частот $100\text{кГц} \pm 10\text{кГц}$, используется весьма широко и дает неопределенности по времени менее 1 мкс на расстояниях свыше 2000 км. Модуляцией фазокодированных сигналов обеспечивается выделение сигналов, полученных через ионосферу, и таким образом создается возможность для измерений, в которых доминирует сигнал, распространяемый поверхностными волнами. Использование различных скоростей модуляции обеспечивает возможность одновременной работы нескольких отдельных передатчиков в одной и той же полосе частот [Potts и Wieder, 1972].

На высоких частотах, где распространение сигналов времени на большие расстояния полностью зависит от состояния ионосферы, точность, с которой они могут быть получены, ограничивается характеристиками среды распространения. Используемая при передачах ширина полос частот в большей степени определяется решениями административных органов, чем техническими или научными оценками. Следует отметить, что многие станции, перечисленные в Отчете 267, передают сигналы времени в виде модуляции звуковой частотой. Сигналы имеют форму, заранее рекомендованную МККР, и состоят из n периодов звуковой модуляции 200 н Гц , в результате чего формируется сигнал постоянной длительности, составляющей 5 мс. Значения n могут соответственно меняться для различения сигналов разных станций.

Так, WWV и ряд других станций приняли форму сигналов времени с $n=5$, то есть 5 периодов модуляции 1000 Гц. Для WWVH n было выбрано равным 6, тогда как JJY приняло сигнал с $n=8$. Использование этой формы сигнала не позволяет выделить одну из нескольких составляющих сигнала, полученного по более чем одной траектории (многолучевое распространение). Однако это достаточно экономно для заданной ширины полосы частот. В условиях распространения с пропаданием сигнала могут возникать легко распознаваемые искажения формы сигнала.

Метод передачи сигнала, который не требует использования избыточной ширины полосы, был исследован для применения в навигации [Casselman и Tibbals, 1958] и синхронизации [Morgan и Baltzer, 1964]. Этот метод использует интерференцию между двумя близко расположенными несущими частотами, когерентными по фазе, для создания грубых временных меток. Использование этих меток в приемнике с достаточной стабильностью фазы служит для опознавания отдельного периода несущих частот; затем из наблюдений за фазой несущей частоты могут быть получены точные метки времени.

Первые эксперименты с использованием частот 19,9 и 20,0 кГц на трассе длиной 1400 км установили их перспективность для опознавания периода несущей частоты. О более поздних экспериментальных исследованиях, включая метод «извлечения» сигналов времени с применением обычных ОНЧ приемников и описание результатов, полученных за несколько месяцев на трассе длиной около 2400 км, сообщалось в [Feu и Looney, 1967]. Дальнейшие исследования с использованием различных разносов частот на разных трассах были описаны в [Raules и Burgess, 1967]. Для использования при передачах WWVL на частотах 20,0 и 19,9 кГц был сконструирован экспериментальный двухчастотный временной приемник [Chi и Witt, 1966]. Результаты всех этих исследований показали, что разница в 100 Гц между несущими частотами слишком мала, чтобы позволить надежно идентифицировать суточный период несущей на произвольной трассе распространения; в последующих сериях экспериментов к излучению WWVL была добавлена третья несущая частота, обеспечивающая разницу между частотами в 500 и 600 Гц. Результаты, полученные в этих условиях, свидетельствуют о том, что при достаточном усреднении опознавание периода может осуществляться на расстояниях вплоть до 8000 км. Аналитическое исследование с применением методов теории информации показало, что системы с несколькими несущими частотами могут быть оптимальными с точки зрения рационального использования ширины полосы частот [Jespersen, 1967]. Морган [1967] дает полезную библиографию по общим вопросам этого метода передачи сигналов времени.

Проводились теоретические исследования аналогичных узкополосных систем в ОНЧ диапазоне [Egidi, 1969]. Были исследованы две методики. Первая основана на использовании специальной формы волны, которая может быть интерпретирована как продукт двух синусоидальных сигналов с одинаковой амплитудой, имеющих частоты в интегральном выражении с соответствующими фазовыми соотношениями. Эта методика применяется преимущественно для синхронизации, достигаемой при фазовой модуляции радиочастотных сигналов [Egidi и Oberto, 1964a и b] (не по огибающей). Во второй методике используются периодические фазовые преобразования несущей; случаи преобразований при нулевой и $\pi/2$ фазе детально рассмотрены в [Egidi, 1968]. В работе, на которую дана ссылка, также приводятся результаты вычислений, указывающих соотношение между временными разделениями и шириной полосы частот системы.

Было также предложено использовать систему с несколькими несущими частотами в ОНЧ диапазоне [МККР, 1966—69], что делает возможным передачу сигналов времени как 1 с, так и 10 мс без нарушения передач службы связи. Теоретическое описание передач с тремя частотами и приемных устройств дано в вышеупомянутом документе МККР.

Существует предел точности синхронизации, который достигается путем использования двух или более близко расположенных сигналов. Ограничения возникают из-за групповой задержки T сложного сигнала, которая определяется выражением

$$T = (\varphi_2 - \varphi_1)/2\pi(f_2 - f_1),$$

где φ_1 и φ_2 — фазовые задержки сигналов с частотами f_1 и f_2 . Можно ожидать, что изменения фазовых задержек, обусловленные изменениями времени распространения, приближаются к нулю по мере приближения к нулю $(f_2 - f_1)$. Однако эффект аддитивных шумов, по существу, не зависит от разноса частот. При таких условиях стандартное отклонение групповой задержки σ_T определяется следующим выражением [Morgan и Baltzer, 1964]:

$$\sigma_T = (\sqrt{2}\sigma_\varphi)/2\pi(f_2 - f_1),$$

где $\sigma_\varphi = \sigma_{\varphi_1} = \sigma_{\varphi_2}$ — стандартное отклонение фазовых задержек, обусловленное аддитивными шумами. Например, если $\sigma_\varphi = 1$ мкс и $f_1 = 20$ кГц, то при $f_2 = 20\,001$ Гц $\sigma_T = 20\,000$ мкс, а при $f_2 = 20\,100$ Гц $\sigma_T = 200$ мкс. Таким образом, по мере уменьшения разности частот погрешность, обусловленная некоррелированными колебаниями фазы, возрастает.

ССЫЛКИ

- CASSELMANN, C. J. and TIBBALS, M. L. [1958] The Radux-Omega long range navigation system. Proc. Second National Convention on Military Electronics, 385—389.
- CHI, A. R. and WITT, S. N. [1966] Time synchronization of remote clocks using dual VLF transmission. Telemetry Conference Proceedings.
- EGIDI, C. [May 1968] Narrow-band time signals. *Alta Frequenza* (издание на англ. яз.), 37, 459—469.
- EGIDI, C. [1969] Narrow-band time signals for VLF and LF standard transmissions. Mem. Acc. Sci. di Torino, Classe Sc. Trs., Mat. e Nat., serie 4, 8.
- EGIDI C. and OBERTO, P. [1964a] Modulazione d'ampiezza con le tre righe spettrali aventi ampiezza e fasi qualunque (Amplitude modulation with three spectral lines of random amplitude and phase). *Alta Frequenza*, 33d, 144—156 (особенно рис. 11).
- EGIDI, C. and OBERTO, P. [1964b] General distorted three spectral lines amplitude modulation. *AEÜ*, 18 H. 9, 525—526 (особенно рис. 10).
- FEY, R. L. and LOONEY, Jr. C. H. [December 1966] A dual frequency VLF timing system. *IEEE Trans. Instr. and Meas.*, Vol. IM-15, 190.
- JESPERSEN, J. L. [November 1967] Signal design for time dissemination and some aspects. NBS Tech. Note No. 357, Boulder, Co., USA.
- MORGAN, A. H. [June 1967] Distribution of a standard frequency and time signals. *Proc. IEEE*, Vol. 55, 6, 827—836.
- MORGAN, A. H. and BALTZER, O. J. [November 1964] A VLF timing experiment. *Radio Sci. J. Res. NBS/USNC-URSI*, 68D, Vol. 2, 11, 1219—1222.
- POTTS, C. E. and WIEDER, B. [May 1972] Precise time and frequency dissemination via the LORAN-C system. *Proc. IEEE*, Vol. 60, 5, 530—539.
- RAULES, A. T. and BURGESS, B. [November 1967] Results of the two-frequency VLF transmission experiments from Criggion GBZ. *Radio Sci.*, Vol. 2, 11, 1295—1301.

Документы МККР

[1966—69]: VII/34 (Япония).

ОТЧЕТ 271-8

ПОЛУЧЕННЫЕ СТАБИЛЬНОСТЬ И ТОЧНОСТЬ СТАНДАРТНЫХ ЧАСТОТ И СИГНАЛОВ ВРЕМЕНИ В ОНЧ И НЧ ДИАПАЗОНАХ

(Вопрос 3/7)

(1963—1966—1970—1971—1974—1978—1982—1986—1990)

Время распространения (фазовые задержки) ОНЧ сигналов от передатчиков до пунктов, отстоящих от них на тысячи километров, мало изменяется изо дня в день, но имеют место суточные и годовые циклические изменения, обусловленные ионосферными изменениями, зависящими от угла Солнца в зените [Azuma, 1966; Iijima и др. 1968; Десаух и Gabry, 1964]. Рассмотрение вопроса с практической и теоретической точек зрения позволило точно прогнозировать время распространения сигналов не только с учетом суточных и годовых циклических изменений, но и в зависимости от числа солнечных пятен и проводимости нижней стенки волновода, по которому распространяются ОНЧ сигналы. Время распространения сигналов спорадически изменяется, как правило, из-за непрогнозируемых внезапных ионосферных возмущений (SID), которые обычно меняют ионосферу на 20—30 минут, а также из-за явлений поглощения в полярной шапке (РСА), которые изменяют полярную ионосферу на период до недели [Pierce, 1955; Reder и др., 1964; Becker и др.; 1973a].

Наблюдения показали, что фазовый сдвиг, накопленный за 24-часовой интервал, необязательно компенсируется, а может составить $\pm 2\pi$ или величину, кратную ему. «Циклические потери» могут иметь место в нескольких случаях. Например, на больших расстояниях они могут иметь место, когда отношение амплитуд волноводных мод первого и второго порядка меньше единицы ночью и больше единицы днем [Walker, 1967]. В другом случае это может произойти вследствие преобразования мод высокого порядка при восходе Солнца [Ries, 1967]. Кроме того, когда приемник находится на большом расстоянии ($> 10\,000$ км) от передатчика, вполне возможно, что в течение части дня сигналы могут быть приняты по длинной круговой траектории вместо короткой [Thompson и др., 1963]. Если стабильность местного стандарта частоты достаточна, то этот случай легко распознается и принимается во внимание. Подобные эффекты наблюдались в отношении сигналов GBR, NBA и NPM в Австралии, NBA и NPM во Франции и WWVL на Британских островах.

В число других источников вариаций времени распространения входят циклические изменения с периодом 27; 29,53 и 14,765 суток. Период в 27 суток связан со средней скоростью вращения Солнца и был замечен по ионосферным данным [Ratcliff, 1960]. Периоды в 29,53 и 14,765 суток соотносятся с лунными приливами, связанными, соответственно, с синодическим и полусинодическим периодами обращения Луны, и наблюдаются в нижних слоях атмосферы, [Appleton и Beynon, 1949; Brady и Crombie, 1963; Rastogi, 1969; Chakravarty и Rastogi, 1970].

Эффект дисперсии, который является причиной различия фазовой и групповой скоростей ОНЧ и НЧ волн, должен быть рассмотрен в системах синхронизации времени. В НЧ диапазоне заметная дисперсия имеет место в поверхностной волне, распространяющейся по земной поверхности, имеющей конечную проводимость. В ОНЧ диапазоне важны два источника дисперсии. Первый — результат эффекта запредельного волновода Земля—ионосфера [Crombie, 1966]. Вторым [Burgess, 1967] и менее предсказуемым источником дисперсии служит интерференция между несколькими волноводными модами ночью, что является причиной пространственных периодических изменений групповой скорости.

Сигналы времени, излучаемые расположенным вблизи Женевы передатчиком HBG на 75 кГц (см. Отчет 267, таблица II), принимаются на большей части Центральной Европы. Эксперименты показали, что сигналы времени HBG могут быть приняты с помощью простых приемников с точностью выше ± 50 мкс на средних расстояниях (100—1000 км). Стабильность фазы несущей в дневные часы обычно выше ± 2 мкс на расстоянии 500 км.

В передатчике стандартных частот и сигналов времени DCF77 на 77,5 кГц, излучающем официальные сигналы времени и эталонную частоту Федерального физико-технического института (РТВ) ФРГ, модуляция сигналов осуществляется следующим образом: в начале каждой секунды амплитуда несущей уменьшается до 25% от нормальной амплитуды, а затем в конце маркеров секунды, длительность которых составляет 0,1 или 0,2 с, амплитуда несущей возвращается к своему нормальному значению.

Исследования, проведенные РТВ и некоторыми промышленными компаниями, работающими над этой проблемой, установили, что простые генераторы могут быть более надежно синхронизированы по присутствующей остаточной несущей частоте по сравнению с условиями нулевой несущей в течение периода передачи маркера времени.

В методе модуляции, используемом РТВ, поддерживается крутизна падающего фронта. Метод заключается в следующем: в начале каждой секунды задающий передатчик устанавливается на «ноль» до тех пор, пока амплитуда несущей частоты антенны не снизится до 25% от максимальной амплитуды. Затем задающий передатчик устанавливается на более высокую «отметку», чтобы сохранить амплитуду несущей на уровне 25% в течение передачи маркера времени.

В дополнение к амплитудной модуляции секундными маркерами (сигналами) несущая частота DCF77 модулирована по фазе в соответствии с псевдослучайной двоичной последовательностью [Hetzel, 1988]. Последовательность максимальной длины, используемая в данном случае, синхронизирована по фазе с несущей и АМ маркерами секунды. На приемной стороне полученная информация может быть воспроизведена как поисковый сигнал и кросс-коррелирована с принятым псевдослучайным сигналом. Целью этого метода кросс-корреляции является более эффективное использование имеющейся полосы частот, а следовательно, и повышение точности передач сигналов времени. Измерения, проводившиеся на расстоянии 300 км от места расположения передатчика [Hetzel, 1987], подтвердили, что при применении метода кросс-корреляции время прихода псевдослучайного сигнала может быть определено более надежно и с меньшими погрешностями, чем это возможно с АМ сигналами времени при обычном приеме. В дневное время, за исключением зимних месяцев, результирующие флуктуации принятого псевдослучайного сигнала составляли менее полпериода несущей ($< 6,5$ мкс). Псевдослучайный сигнал не влияет на прием АМ сигналов времени и долговременное усреднение фазы несущей.

Исследование [Becker и др., 1973b] показало, что стандартные частоты и сигналы времени, излучаемые передатчиком DCF77 на 77,5 кГц, хорошо принимаются в Центральной Европе и Скандинавии. В дневное время фаза несущей сигнала, принятого на расстоянии 300 км от места нахождения передатчика (Майнфлинген, вблизи Дармштадта, ФРГ), только на несколько десятых долей микросекунды отклоняется от среднего значения из-за изменений условий распространения. В результате на расстоянии 300 км относительная девиация частоты составляет $2,1 \times 10^{-12}$ при усреднении за сутки и $0,4 \times 10^{-12}$ при усреднении за неделю. В полдень сигналы времени передатчика DCF77 принимались с разбросом 37,5 мкс (среднее значение по данным измерений за три года) [Becker, 1972; Becker и Hetzel, 1973].

Аналогичные исследования, проведенные в Соединенном Королевстве в отношении передатчика MSF на 60 кГц [Richards, 1987], выявили присущие данной службе ограничения, особенно в зимние дни, которые обусловлены наличием заметной ионосферной компоненты, образующей в пространственной волне случайную составляющую фазы. Это вызывает фазовые (временные) изменения полного сигнала, составляющие около 0,3 мкс на расстоянии 300 км от передатчика (в условиях спокойного Солнца) и соответствующие суточной нестабильности частоты $3,2 \times 10^{-12}$. Для сравнения, сигнал на частоте 198 кГц (Дройтунг) в значительно меньшей степени подвержен влиянию ионосферы и при эквивалентных условиях обеспечивает стабильность по крайней мере на порядок выше, чем это возможно на 60 кГц.

Французская международная АМ станция в Аллуи, которая передает программы на частоте 162 кГц, также осуществляет передачу французских стандартных частот и сигналов времени.

Сигнал передаваемой несущей стабилизирован по фазе от цезиевого стандарта [Dubouis, 1986a], так что передаваемый сигнал свободен от помех, вызываемых блоком усиления мощности передатчика.

Сигнал несущей модулирован по фазе для передачи кода времени (см. Отчеты 577 и 267).

Прием и декодирование этой модуляции дают возможность принять эталонные сигналы времени и сигналы, содержащие информацию о дате, в шкале UTC с помощью стандартного приемника в любое время на всей территории Франции с точностью до 1 мс. Эта точность главным образом ограничена амплитудной модуляцией передаваемой радиовещательной программы, которую не могут полностью устранить используемые в настоящее время фильтрующие контуры приемника, хотя процесс усреднения, используемый в более сложных приемниках, дает возможность повысить точность на несколько десятков микросекунд.

Прием сигнала несущей позволяет контролировать частоту генераторов с точностью, близкой к 10^{-7} с/т (величина 10^{-12} получается за сутки).

Рубидиевые и кварцевые генераторы были стабилизированы сигналом несущей с погрешностями в пределах 5×10^{-13} — 5×10^{-12} и 5×10^{-11} — 5×10^{-12} , соответственно.

Даже в часах со стандартным кварцевым генератором была достигнута фазовая стабилизация с точностью около 50 нс [Dubois, 1986b].

В Свободном университете (Брюссель) при изучении стабильности приема сигналов времени на расстоянии 420 км от передатчика MSF 60 кГц был использован цифровой метод. При этом форма принятого сигнала разбивается на 250 дискретных значений и проверяется на качество, а средние значения рассчитываются по более чем 200 последовательным импульсным сигналам с помощью мини-ЭВМ.

За время прихода сигнала можно принять время, в которое огибающая сигнала достигает четко определенного процента от среднего значения амплитуды несущей (Ам). Теоретические и экспериментальные исследования показали, что погрешность является минимальной в характерной точке, выбранной между 0,75 и 0,9 Ам [Andrews и др., 1970]. В данном исследовании было выбрано значение 0,85 Ам. Если измерения проводились в середине дня, между 0900 и 1300 часами UTC, стандартное отклонение обычно составляло 5—10 мкс. С другой стороны, флуктуации, которые наблюдаются в течение длительных периодов (несколько месяцев), могут достигать 25 мкс с учетом примененного поправочного коэффициента формы изменения фазы несущей частоты [Liévin и др., 1975].

В СССР проводились исследования новой формы модуляции сигналов времени с целью повышения надежности синхронизации генераторов, использующих несущие частоты станции РБУ ($66\frac{2}{3}$ кГц) как эталонные.

По сравнению с описанными выше сигналами длительность паузы была уменьшена до 5 мс, а частота повторений паузы увеличена до 10 Гц. Маркер и кодирующие сигналы длительностью 80 мс используются для опознавания маркеров секунд и минут. Сигналы формируются с помощью узкополосной фазовой модуляции с индексом модуляции 698 со сдвигом двух поднесущих частот на 100 и 312,5 Гц. Это позволило увеличить защитную полосу [Черенков, 1984а] до 50 Гц, что дает возможность синхронизировать генераторы сигналов с эквивалентной полосой пропускания цепи автоматического контроля фазы до 20 Гц. Фазовое дрожание выходного сигнала синхронизированного генератора (или сигнала на выходе приемника с той же полосой пропускания), обусловленное фазовой модуляцией несущей, не превышает 20 нс.

Применение фазовой модуляции позволило использовать полную мощность передатчика и создать большие уровни мощности как для маркера, так и для информационных битов, равные, соответственно, 0,735 и 0,215, относительно максимальной мощности немодулированной передачи [Черенков, 1984б].

Генерирование информационных и маркерных битов на поднесущих частотах увеличивает объем информации, который можно передать с помощью частотной или фазовой модуляции на поднесущих в течение других интервалов длительностью 80 мс, в настоящее время не используемых. Увеличенная частота повторения маркеров времени (10 Гц) способствует более точному определению их временного положения путем усреднения большего числа результатов за такой же интервал измерения.

В Японии было сообщено о проводившихся экспериментах по передаче НЧ (40 кГц) сигналов на расстоянии 400 км. Установлено, что стандартная девиация ежесуточной флуктуации фазы несущей частоты составляет 1 мкс летом и 2 мкс зимой; сезонные изменения фазы сигнала, полученного в полдень, достигают 3,3 мкс.

Влияние внезапного ионосферного возмущения (SID) в слое D на синхронизацию и калибровочную частоту в системе Logan-C было исследовано в Китае в Шаньсийской астрономической обсерватории (CSAO). В период возмущения сигналы пространственных волн, отраженные от верхних слоев ионосферы, усиливаются, а некоторые из них смешиваются с дискретизированными сигналами поверхностных волн, что вызывает девиацию фазы около 0,1—2 мкс в сигналах поверхностных волн [Miao и Yang, 1981].

В течение ряда лет в CSAO проводились непрерывные измерения сигналов Logan-C 100 кГц (расстояние между передающими и приемными пунктами равно 2006 км). На основе анализа этих измерений оказалось возможным выяснить, как изменяются задержка (фазы сигнала) и напряженность поля однократно отраженной пространственной волны в зависимости от солнечного цикла, времени года, времени дня и т. д., а также определить диапазон этих изменений. Кроме того, в связи с необходимостью учета рефракционных эффектов ионосферы из результатов измерений и их анализа были получены соответствующие значения эффективной высоты, на которой происходит отражение сигналов, и параметра экспоненты модели концентрации электронов для слоя D ионосферы, а также установлены направления, в которых эти значения изменяются. На основе этих результатов точность временных данных, переданных через однократно отраженную волну, может быть повышена до $\pm 1,2$ (среднеквадратичное значение) и $\pm 2,8$ мкс (среднеквадратичное значение), соответственно, в дневное и ночное время (кроме восхода и заката солнца). И это справедливо, так как разница между прогнозируемыми и измеренными значениями находится в пределах $\pm 1,5$ мкс для задержки сигналов и $\pm 2,5$ дБ для напряженности поля в районе, где для передачи временных данных может быть использован однократно отраженный сигнал пространственной волны BPL (см. примечание, ниже) [Pan и Li, 1986; Pan, 1988].

Примечание. — BPL является позывным сигналом 100 Гц передатчика сигналов времени в Шаньси (Китай).

Был проведен анализ изменений в сигналах Logan-C, передаваемых станцией Y Северозападной тихоокеанской цепочки в Шаньсийскую астрономическую обсерваторию (Китай), расстояние между которыми составляет около 2000 км; из них 1200 км имеют типично сложные условия поверхностного распространения; эти результаты проверены путем сравнения с результатами, полученными с помощью GPS с использованием метода одновременного наблюдения за период с июня 1987 по июнь 1988 года. Результаты исследований показывают, что кратковременная флуктуация фазы в длинноволновых сигналах является главным компонентом изменения временных задержек, и $\sigma = \pm (0,20 \sim 0,26)$ мкс. Значение изменения задержки может удерживаться в пределах 0,5 мкс посредством цифрового фильтрования. При времени интегрирования 10 дней изменение задержки в течение одного года будет находиться в пределах 0,2 мкс [Potts и Weider, 1972; Wu, Liang и Qu, 1988].

Время распространения сигнала Logan-C поверхностными волнами по суше в северной части Японии измерялось в 21 пункте. Запаздывание наблюдаемой фазы составило 8,9 пс/м по отношению к бегущей волне в атмосфере с рефракционным индексом 1,000338. Флуктуации принимаемой фазы по большей части находились в пределах $\pm 0,5$ мкс, за исключением двух пунктов, где флуктуации составили $\pm 1,5$ мкс. Фазовая задержка 5,7 пс/м наблюдалась на борту судна в море и в пункте на суше, где влияние проводимости грунта считается небольшим. Среднее значение вычисленной фазовой задержки равно 5,4 пс/м, когда используется эффективный план проводимости для частоты 1 МГц [Naga и др., 1988; Ono, 1985].

Экспериментальные данные [Noonkester, 1972] свидетельствуют о том, что время распространения ОНЧ сигналов подвержено изменениям, связанным с лунными полусинодическими периодами, что оказывает влияние на распространение частотно-временной информации посредством ОНЧ передач. Как было установлено, средняя амплитуда лунного полусинодического периода равна 0,18 мкс в полдень и 0,52 мкс в полночь для одного тракта ОНЧ передачи в направлении с севера на юг на частоте 10,2 кГц. Максимальная амплитуда, как установлено, равна 1,3 мкс в среднезимние месяцы в полночь. Пользователям частотно-временной информации, передаваемой ОНЧ передатчиками, должны быть сообщены данные об известных периодических составляющих, чтобы они могли предвидеть определенный диапазон погрешностей.

Что касается долговременной интеграции полученной фазы, то точность, которая может быть достигнута, в значительной степени будет зависеть от сложности приемного оборудования и измерительных процедур. Сообщалось [Leschiutta, 1968], что при использовании на приемных станциях кварцевых генераторов накопленная суммарная погрешность для трасс протяженностью 1000—5000 км при приеме передач в диапазонах 4 и 5 составляет 25—50 мкс в год. Однако, когда фаза принятого сигнала сравнена с атомным стандартом и используется приемник, который может быть калиброван и который не теряет «эталонную» фазу сигнала [Becker и др., 1969], могут быть достигнуты намного лучшие результаты. Так, изменения относительно средней фазы принятого на расстоянии 5000 км сигнала NSS, который регистрировался на протяжении более чем 450 дней, составляют максимум ± 10 мкс, а обычно не превышают ± 3 мкс. Последняя цифра эквивалентна неопределенности частоты, составляющей около 1×10^{-13} за год. Дальнейшего повышения стабильности принятой фазы сигнала можно достичь путем формирования линейной комбинации фазы двух излучений на различных частотах, с тем чтобы значительно ослабить влияние основных солнечных эффектов; повышение стабильности особенно заметно, когда сличения проводятся одновременно в обоих направлениях передачи по одной и той же трассе на несущих частотах, не слишком далеко разнесенных в диапазоне 4. Еще большую точность эталонной фазы можно получить путем применения метода сглаживания, основанного на статистическом характере фазовых колебаний [Becker и др., 1969; Guetrot и др., 1969], но все это эффективно только в ограниченные периоды, когда статистические характеристики могут считаться типичными для процесса.

Когда появилась возможность использовать систему Logan-C для высокоточных сличений шкал времени, стало легче измерять изменения задержек сигналов при распространении, а следовательно, и проводить сличения шкал времени с использованием фазы несущей частоты ОНЧ сигнала (значения фазы для Лоран-С см. в Сообщениях службы времени Военно-морской обсерватории США (USNO), серия 4). Такие измерения производились в течение нескольких лет на трассе протяженностью около 5000 км между Северной Америкой и Европой. Были использованы 3 ОНЧ передачи (NAA, 17,8 кГц; GBR, 16 кГц; Omega-Trinidad, 12,0 кГц). Типичные результаты приведены в таблице I. В таблице I $\sigma_{\Delta t}(\tau)$ — среднее изменение (деленное на $\sqrt{2}$) измеренной разности времени Δt , которое имело место в течение времени измерения τ . Этот метод статистической обработки принадлежит Колмогорову [1941], Малахову [1966а и b] и Аллену [1966]. $\sigma_y(\tau)$ — относительная неопределенность сличения частоты за время измерения τ .

ТАБЛИЦА I — Типичные флуктуации задержек ОНЧ сигналов на трассе между Северной Америкой и Европой

τ (дни)	$\sigma_{\Delta t}(\tau)$ (мкс)	$\sigma_y(\tau)$ (10^{-12})
1	1,9	31
10	2,6	4,2
100	3,7	0,61
1000	5,3	0,09

Аналогичным образом были установлены влияния сезонных изменений на $\sigma_{\Delta t}(\tau)$, а также годовые и полугодовые корреляции флуктуаций распространяемых сигналов. Из-за корреляции между смежными значениями возможность повышения точности измерений путем усреднения значений является весьма ограниченной: в наиболее благоприятном случае измеряемая погрешность уменьшается наполовину (с 2,2 до 1,1 мкс) путем усреднения 100 измеренных за день значений вместо использования только одного значения.

В более поздних экспериментах, проведенных в NPL (Индия), результаты долговременной интеграции несущей частоты GBR были косвенно подтверждены результатами измерений с использованием Logan-C и прямо подтверждены путем измерений через канал геосинхронного спутника. За период, охватывающий один год, была достигнута точность в несколько частей на 10^{14} по частоте и 1—2 мкс по времени [Sen Gupta и др., 1980; Mathur и др., 1980].

Для восстановления соотношения фаз ОНЧ сигнала были разработаны специальные методы измерений, а также калибрования с целью определения временных задержек в антенне и приемнике [Becker и др., 1973а; Becker, 1973]. При этом методе используется тестовый сигнал, который контролируется параллельным разделительным каналом, генерирующим шкалу времени. Если этот метод используется для восстановления потерянного соотношения фаз, средняя погрешность в случае короткого перерыва составляет 1,1 мкс и значения до и после перерыва коррелируются. Если перерыв большой (например, больше 60 дней), измеренные значения до и после перерыва не коррелируются, а средняя погрешность равна 4,7 мкс.

Применяются и другие методы для опознавания периода несущей. Использование двух когерентных ОНЧ сигналов для передачи времени было впервые предложено в 1962 году [Morgan, 1962], а демонстрации этого метода состоялись в 1966 году [Chi и Witt, 1966; Feu и Looney, 1966]. Это двухэтапный метод восстановления времени. Фазы частоты ОНЧ сигналов используются для определения временной разности между часами в передающем и приемном пунктах менее одного периода несущей частоты (точное время), а разность фаз между принятыми сигналами двух когерентно переданных сигналов и локально генерированным сигналом — для определения периода несущей частоты одного из принятых сигналов (грубое время). Экспериментальная радиостанция WWVL Национального бюро стандартов США в Форт-Коллинзе (Колорадо) с 1964 по 1968 годы использовалась для проведения испытаний этого метода. Опорными частотами сигналов были 19,9 и 20 кГц. Были испытаны разности частот до 700 Гц. При разности частот выше 500 Гц опознавание периода несущей ухудшилось, что было обусловлено большим эффектом частотной дисперсии среды распространения.

Навигационная система Omega использует для распространения частотно-временной информации ОНЧ передачи на нескольких частотах. Преимущества этого метода установлены достаточно хорошо [Swanson и Kugel, 1972]. Эти передачи являются ценным источником частоты и точного времени и должны усилить статус ОНЧ метода в этой области. В общей сложности 8 станций этой системы обеспечивают непрерывную (и даже с некоторым запасом) глобальную зону охвата. Каждая станция выделяет свою фазу излучений из группы из четырех цезиевых стандартов частоты и каждые 10 с передает навигационные частоты на основе временного разделения. Четыре навигационные частоты — это 10,2; 11,05; $11\frac{1}{3}$ и 13,6 кГц. Каждая станция также излучает дополнительную частоту в диапазоне 11,8—13,1 кГц, из которой может быть извлечена информация о времени и частоте. Эти дополнительные передачи приведены в таблице III в Отчете 267.

Уже проводились работы в области точной двухчастотной синхронизации [Chi и др., 1972]. В ходе испытаний, проведенных в 1973 и 1974 годах с использованием сигналов на частотах 13,10 и 12,85 кГц для передачи времени со станции Omega в Северной Дакоте, было продемонстрировано надежное опознавание периодов несущей на расстояниях до 7000 км [Chi и Wardrip, 1973 и 1974]. Дальнейшие испытания на трассах протяженностью до 15 000 км с использованием экспериментальных передач со станций Omega проводились в Северной Дакоте и на Гавайях.

ОНЧ передачи с большим радиусом действия и фазовой устойчивостью обеспечивают эталонные сигналы времени для сличения шкал времени на международном уровне с точностью ± 1 мкс.

ССЫЛКИ

- ALLAN, D. W. [February 1966] Statistics of atomic frequency standards. *Proc. IEEE*, Vol. 54, 2, 221—230.
- ANDREWS, D. H., CHASLAIN, C. and DE PRINS, J. [1970] Reception of low frequency time signals. *Phase and Frequency Instabilities in Electromagnetic Wave Propagation*. (Ed. by Davies-Technivision Services), 198—218.
- APPLETON, E. V. and BEYNON, W. J. G. [1949] Lunar oscillations in the D-layer of the ionosphere. *Nature*, Vol. 164, 308.
- AZUMA, Y. [January 1966] Results of the phase measurement of VLF radio waves received from NPG/NLK. *J. Radio Res. Labs. (Japan)*, Vol. 13, 13—23.
- BECKER, G. [1972] Aussendung und Empfang des Zeitmarken- und Normal-Frequenzsenders DCF77 (Emission and reception of the time-signal and standard-frequency transmitter, DCF77). *PTB-Mitt.*, 82, 224.
- BECKER, G. [1973] Längstwellenausbreitung während der Sonnenaktivität im August 1972 (VLF propagation during the period of the highly active sun in August 1972). *PTB-Mitt.*, 83, 147.
- BECKER, G., FISCHER, B. and KRAMER, G. [1969] Methoden und Ergebnisse im internationalen Zeitvergleich mit Längstwellen (Methods and results in international time comparison with very low frequencies). *Actes du Colloque International de Chronométrie*, A-22 Série A, Paris.
- BECKER, G., FISCHER, B. and HETZEL, P. [1973a] Langzeituntersuchungen über die Unsicherheit von Zeit- und Frequenzvergleichen mittels Längstwellen (Long-term investigations on the error of time and frequency comparisons by means of VLF). *PTB-Mitt.*, 83, 222.
- BECKER, G., FISHER, B. and HETZEL, P. [1973b] Methoden zum Vergleich und zur Verbreitung von Zeitskalen (Methods for the comparison and dissemination of time scales). *Kleinheubacher Berichte*, 16, 5—38.
- BECKER, G. and HETZEL, P. [1973] PTB-Jahresbericht 1972 (PTB Annual Report 1972), 107, Braunschweig.
- BRADY, A. H. and CROMBIE, D. D. [October 1963] Studying the lunar tidal variations in the D-region of the ionosphere by means of very low frequency phase variations. *J. Geophys. Res.*, Vol. 68—4, 19, 5437—5442.
- BURGESS, B. [November 1967] On the propagation delay of modulated VLF waves transmitted over great distances. *IEE Conf. Publ.* 36, 164—168.
- CHAKRAVARTY, S. C. and RASTOGI, R. G. [May 1970] Lunar tide in D-region of the ionosphere near the magnetic equator. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 32, 1, 945—948.

- ЧЕРЕНКОВ Г.Т. [1984a] Характеристики эталонных сигналов частоты и времени, передаваемых через специализированные радиостанции. *Измерительная техника*, 1, 22.
- ЧЕРЕНКОВ Г.Т. [1984b] Использование фазовой модуляции для передачи эталонных сигналов. *Измерительная техника*, 1, 24.
- CHI, A. R., FLETCHER, L. A. and CASSELMANN, C. J. [October 1972] Omega time transmissions and receiver design. Proc. National Electronics Conference, Vol. 27, 268—273.
- CHI, A. R. and WARDRIP, S. C. [December 1973] Clock synchronization experiments using Omega transmissions. Proc. 5th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Planning Meeting (NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md. 20771, USA), 369—392.
- CHI, A. R. and WARDRIP, S. C. [1974] Recent field test results using Omega transmissions for clock synchronization. Proc. 6th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Planning Meeting (US Naval Research Laboratory, Washington, DC, USA), 187—197.
- CHI, A. R. and WITT, S. M. [April 1966] Time synchronization of remote clocks using dual VLF transmissions. Proc. 20th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 588—611 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).
- CROMBIE, D. D. [March 1966] The effect of waveguide dispersion on VLF timing systems. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-15, 322—323.
- DUBOUIS, B. [1986a] France Inter: L'émetteur français de fréquence étalon et de signaux de temps codé. *L'onde électrique*, Vol. 66, 4—5, 111—120.
- DUBOUIS, B. [April 1986b] Réception de la fréquence porteuse de France Inter-Asservissement en fréquence et en phase d'oscillateurs. Bulletin du bureau national de métrologie. Vol. 17, 63—64, 86—90.
- DECAUX, B. and GABRY, A. [January 1964] Some particular observations on diurnal phase variations of VLF transmissions received in Paris. *Radio Sci. J. Res. NBS/USNC-URSI*, Vol. 68D, 1, 21—25.
- FEY, R. L. and LOONEY, C. H. Jr. [December 1966] A dual frequency VLF timing system. *IEEE Trans. Instr. and Meas.*, Vol. IM-15, 4, 190—195.
- GUETROT, A., HIGBIE, L. S., LAVANCEAU, J. and ALLAN, D. W. [May 1969] Proc. 23rd Annual Symposium on Frequency Control, Atlantic City, NJ, USA (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703) (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).
- IJIMA, S., TORAO, M. and FUJIWARA, K. [1968] Phase variations of VLF waves, GBR and GBZ, as received. *Tokyo Astr. Obs. Annals*, Vol. 11, 1—28.
- HARA, T., HORIAI, K., SATO, K.-H., FUJISHITA, M., SAKAI, S., IWADATE, K. and ASARI, K. [1988] Measurements of the propagation time of Loran-C signals. Proc. 20th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting (Vienna, Virginia 22180, United States), 145—150.
- HETZEL, P. [1987] Zeitübertragung auf Langwelle durch amplituden-modulierte Zeitsignale und pseudozufällige Umtastung der Träger-phase (Time transmission on LF by amplitude-modulated time signals and pseudo-random phase shift keying of the carrier); dissertation, Institut für Zeitmeßtechnik, Fein- und Mikrotechnik, of the University Stuttgart.
- HETZEL, P. [March 1988] Time dissemination via the LF transmitter DCF77 using a pseudo-random phase-shift keying of the carrier. Proc. 2nd European Frequency and Time Forum, Neuchâtel, 351—364.
- КОЖИМОГОВ А.Н. [1941] ДАН СССР. Т.32.19 и Т.30.299.
- LESCHIUTTA, S. [1968] Conservazione a lungo termine di scale di tempo. Proc. Colloquium on problems of the time determination, keeping and synchronization, Milano-Brera, 111—132.
- LIÉVIN, J. C., GUILLAUME, F. and DE PRINS, J. [1975] Méthode digitale de mesure des signaux horaires à B.F. et T.B.F. Laboratoire des Etalons de Fréquence (U.L.B.). Rapport interne No. 64.
- МАЛАХОВ А.Н. [1966a] Спектрально-корреляционный анализ сигналов в неинтегральном спектре. *Радиофизика*, т.9, 595.
- МАЛАХОВ А.Н. [1966b] Форма и ширина спектральной линии отклонения в присутствии нестационарных частотных флуктуаций. *Радиофизика*, т.9, 625.
- MATHUR, B. S., BANERJEE, P., SOOD, P. C., SAXENA, M., KUMAR, N. and SURI, A. K. [1980] Precise T & F intercomparison between NPL, India, and PTB, Federal Republic of Germany, via Satellite Symphonie-I. Proc. 12th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting (NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md., USA).
- MIAO, Y. and YANG, K. [1981] The effect of the solar X-ray burst on the timing and calibrating frequency of long wave. Publication of the Shaanxi Astronomical Observatory, 1, 35—42.
- MORGAN, A. H. [July 1962] A new method of time signal modulation and demodulation of VLF carriers. US National Bureau of Standards, Report 7286.

- NOONKESTER, V. R. [November 1972] D-region lunar variations deduced from long path 10.2 kilohertz phase measurements. *J. Geophys. Res.*, Vol. 77, 33, 6592—6598.
- ONO, F. and NAGAMORI, K. [1985] Effect of Loran-C wave propagation on land and preparation of correction chart based on its evaluation (на японском яз.). *Rep. Hydrographic Res.*, 151—166.
- PAN, L. D. [1988] Analysis and study on a propagation path of LF sky-wave signals. *Scientia Sinica*, A edition, No. 2, 205—212.
- PAN, L. D., and LI, D. M. [1986] The range of the sky-wave and the accuracy of time and frequency calibration. *Publications of the Shaanxi Astronomical Observatory*, Vol. 9, No. 2, 43—50.
- PIERCE, J. A. [1955] The diurnal carrier phase variations of a 16 kc/s transatlantic signal. *Proc. IRE*, 43, 584—588.
- POTTS, C. E. and WIEDER, B. [1972] Precise time and frequency dissemination via the Loran-C system. *Proc. IEEE*, Vol. 60, 5.
- RASTOGI, R. G. [May 1969] Lunar tidal oscillations in ionospheric absorption at Colombo. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 31, 759—761.
- RATCLIFF, J. A. [1960] *Physics of the Upper Atmosphere*. Academic Press, New York, NY, USA.
- REDER, F. H., ABOM, C. J. and WINKLER, G. M. R. [March 1964] Precise phase and amplitude measurements on VLF signals propagated through the arctic zone. *Radio Sci. J. Res. NBS/USNC-URSI*, Vol. 68D, 3, 275—281.
- RICHARDS, L. J. [May 1987] The effects of propagation on the stability of received MSF signals. Working paper RAD/NAV (87) radio and navigation department, Royal Aircraft Establishment, Farnborough, Hants.
- RIES, G. [June 1967] Results concerning the sunrise effects of VLF signals propagated over long paths. *Radio Sci.*, Vol. 2 (New Series), 531—538.
- SEN GUPTA, A., GOEL, G. K. and MATHUR, B. S. [1980] Precise T & F intercomparison via VLF phase measurements. Proc. 12th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting (NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md., USA).
- SWANSON, E. R. and KUGEL, C. P. [May 1972] VLF timing: conventional and modern techniques including Omega. *Proc. IEEE*, Vol. 60, 540—551.
- THOMPSON, A. M., ARCHER, R. W. and HARVEY, I. K. [November 1963] Some observations on VLF standard-frequency transmissions as received at Sydney N.S.W. *Special International Issue of IEEE*, Vol. 51, 11.
- WALKER, D. [November 1967] Cycle slipping of VLF signals during sunrise and sunset. *IEE Conf. Publ.* 36, 169—173.
- WU, G., LIANG, Z., and QU, L. [November 1988] A verification for seasonal variation of LF ground-wave propagation delay with GPS common view comparison (The Third Symposium of Precise Time).

ЛИТЕРАТУРА

Документы МККР

[1978—1982]: 5/1015-E (Югославия).

ОТЧЕТ 363-7

МЕТОДЫ ПЕРЕДАЧИ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВРЕМЕНИ И СТАНДАРТНЫХ ЧАСТОТ

(Исследовательская программа ЗС/7)

(1966—1970—1974—1978—1982—1986—1990)

1. Введение

В передачах времени и стандартных частот стали использоваться новые методы, которые особенно подходят для сличения атомных часов, работающих в международной координированной системе времени. Однако эти виды применения выходят за рамки более традиционного использования службы стандартных частот и сигналов времени (SF и TSS), существовавшей тогда, когда атомные часы были впервые приняты для широкого применения. По сравнению с осуществлением миллисекундной синхронизации, которая обычно требуется подавляющему большинству пользователей SF и TSS, использование атомных стандартов требует проведения измерений с возможно малой погрешностью. Лучший результат, который был получен до сих пор при сравнении на большие расстояния, — измерения с погрешностью, приближающейся к 1 нс.

В настоящем Отчете рассматриваются общие принципы синхронизации и дается обзор различных характеристик и опыта, полученного при использовании указанных методов как в условиях экспериментов, так и в условиях эксплуатации.

2. Основные положения

2.1 Требования к координированной синхронизации

По сравнению с немедленным доступом к надежному источнику времени, что обычно требуется большинству пользователей SF и TSS, измерения, необходимые для международной координированной синхронизации эталонов, требуют очень точных методов передачи сигналов времени, которые могут использоваться лишь время от времени. Затраты на оборудование менее важны, чем полученная точность или воспроизводимость измерений, которые являются первостепенной задачей. По этим причинам были исследованы многие методы, даже если они не могли быть использованы в системах, являющихся действующими в общепринятом смысле. Примером может служить глобальная система определения местоположения (GPS), которая использовалась для передачи сигналов времени задолго до того, как была принята в качестве действующей навигационной системы. В качестве других примеров можно привести использование интерферометров с сверхдлинной базой (VLBI) для сличений шкал времени или метод «одновременного наблюдения», который может использоваться для любого источника синхронизированного и несинхронизированного сигнала.

2.2 Коррекция релятивистских эффектов для передачи времени с наивысшей точностью

В Отчете 439 обсуждаются принципы и приводятся формулы для расчета релятивистских поправок, которые необходимо применять во всех случаях, где требуется точность порядка 100 нс или выше.

2.3 Ширина полосы частот и отношение сигнал/шум при высокоточной передаче времени

Измерения принимаемых сигналов времени с малой погрешностью требуют соответствующей ширины полосы передаваемых частот. Это обусловлено двумя причинами: во-первых, должна быть минимизирована длительность фронта сигнала для снижения погрешности при передаче, а во-вторых, должны быть сведены к минимуму изменения групповой задержки через линии связи. Эти изменения могут составлять небольшой процент групповой задержки. Следовательно, ширина полосы частот до детектирования должна быть настолько большой, насколько это возможно. Существующее отношение сигнал/шум лишь определяет время накопления сигнала (ширину полосы частот после детектирования), необходимое для проведения измерений с заданной погрешностью. На практике это привело к возросшему значению методов расширения спектра для систем синхронизации времени. Кроме того, необходимо провести разграничение между шириной полосы частот, требуемой для данной информации, и эффективной шириной полосы частот, используемой сигналом. В случае GPS эффективная ширина полосы частот кода C/A составляет 1 МГц, а действительная передача информации (навигационные сообщения) происходит на умеренной скорости 50 Бд. Однако сама синхронизация осуществляется путем использования быстрых переходов модуляции с расширенным спектром, поэтому обеспечивается полное использование ширины полосы частот кода. Для системы Logan-C, являющейся НЧ навигационной системой, широко используемой для синхронизации, эффек-

тивная ширина полосы частот сигнала равна 20 кГц (сигнал модулируется) и отсутствует передача данных. В этом случае неопределенность синхронизации составляет несколько десятых долей микросекунды (1% от 50 мкс равен 0,5 мкс, следовательно, еще раз подтверждается практическое правило, что неопределенность ограничивается величиной, составляющей примерно 1% от обратной величины эффективной ширины полосы частот). Общую информацию о методах расширения спектра см. в [Dixon, 1976]. Дополнительные преимущества использования методов расширения спектра — это существенное снижение чувствительности к помехам при приеме в городских зонах (телевизионные гармоники могут быть серьезной проблемой) и уменьшение величины изменения задержки распространения в сети, обусловленной изменениями ширины полосы частот, занимаемой сигналом. Последний эффект является главным источником погрешностей при приеме стандартных ВЧ частот и сигналов времени. С другой стороны, большая ширина полосы частот также может создать проблемы, если в канале присутствуют дисперсия или многолучевость.

2.4 Односторонняя передача времени в сравнении с двусторонней

Односторонний метод, то есть работа только на прием, может использоваться с высокой точностью, если задержка распространения или считается постоянной (в этом случае ее надо измерять только один раз), или может быть определена каким-нибудь другим способом. Это объясняет потенциальную возможность использования электронных навигационных систем для передач сигналов времени, так как подобные системы были разработаны для предоставления позиционной информации, то есть задержки распространения, как главного параметра. В этих системах у пользователя нет необходимости осуществлять передачи, что является дополнительной сложностью в двусторонних системах. С другой стороны, при почти одновременном обмене сигналами, задержка распространения может быть определена довольно легко, принимая во внимание «обратимость». Однако предположение относительно «обратимости» должно быть проверено до того, как двусторонний метод передачи времени может быть использован с полной уверенностью. В принципе, двусторонний метод дает наименьшую неопределенность.

2.5 Эффекты выбора частоты (диапазон ОНЧ — оптическая частота)

В прошлом основу передач времени составляли более низкие частоты, включая ВЧ, однако все высокоточные методы передачи требуют, чтобы влияние ионосферы было настолько малым, насколько это возможно, и поэтому все больше и больше используются полосы частот ОВЧ диапазона и выше. Однако с увеличением частоты и, соответственно, уменьшением влияния ионосферы важным фактором быстро становятся тропосферные эффекты. В частности, водяной пар может оказаться большей проблемой, чем это ожидалось, из-за быстрых и нерегулярных изменений в концентрации водяного пара на линии прямой видимости, измеренной различными устройствами. Это служит веским аргументом в пользу применения оптических частот (лазеров) для исключительно высокоточных передач времени. (Для получения более детальной информации см. также Отчет 271.)

2.6 Спутниковые линии по сравнению с наземными СВЧ линиями

Значительным преимуществом спутниковых линий является большая ширина полосы частот и связь в пределах прямой видимости на частотах, где может быть минимизировано влияние ионосферы. Недостаток таких линий заключается в том, что задержка распространения в них очень велика по сравнению с наземными СВЧ линиями и должна определяться непрерывно. Волоконно-оптические линии, как ожидается, могут заменить СВЧ линии и получить широкое применение в текущем десятилетии. Остается лишь посмотреть, какой точности сможет достичь синхронизация за счет использования волоконно-оптических линий большой протяженности. Положение дел в высокоточной передаче времени в настоящее время полностью зависит от спутниковой технологии, включающей системы связи и навигационные спутниковые системы.

2.7 Дистанционные измерения времени с помощью компьютера с использованием одновременно принимаемых и объединенных временных источников

Низкая стоимость мини- и микрокомпьютеров способствовала введению еще одного «измерения» в сличения шкал времен на большие расстояния. Были введены в эксплуатацию удаленные, полностью автоматизированные станции времени, на которых проводятся регулярные измерения сигналов, одновременно принимаемых на разных станциях, или всех синхронизированных сигналов, имеющихся в пункте. Центральный компьютер собирает данные, фильтрует измерения и приводит их в соответствие с измерениями, проведенными в других местах. Полученный результат затем посылается на станцию для распечатки на месте и дальнейшего использования. О нескольких таких системах сообщили USNO [Wheeler, 1983] и NBS [Allan и Weiss, 1980; Stein и др., 1983]. В одной системе NBS использована NBS-конструкция GPS приемника, в то время как другая основывается на приеме передач или системы Logan-C, или службы WWVB. В системе USNO использовалось только серийное оборудование высокого уровня, такое как автоматические приемники Logan-C или серийные GPS устройства для передачи сигналов времени. Подобные системы могут быть приспособлены к различным нуждам удаленного пункта [Wheeler, 1983]. В тех случаях, когда в удаленных пунктах установлены GPS приемники, сообщалось о погрешностях порядка 10 нс и о разрешающей способности в несколько наносекунд [Allan и др., 1985].

3. Обзор используемых методов передачи сигналов времени и частоты

3.1 Сличение с использованием сигналов в диапазонах 4—7 и через перевозимые часы

Методы сличения шкал времени с использованием сигналов в диапазонах 4—7 и перевозимых часов применялись более 20 лет, однако в настоящее время необходимо признать, что их важность уменьшается со следующими исключениями:

- частотно-стабилизированные ОНЧ передачи навигационной системы Omega, а также некоторых радиостанций большой мощности могут использоваться как недорогие частотно-фазовые эталоны в отдаленных районах. В настоящее время они используются для целей аэронавигации небольших воздушных судов. Точность синхронизации шкал времени сигналами этой системы была определена и документирована Гино [1968 и 1969] (см. также Отчет 271);
- частотно-стабилизированные НЧ передачи, такие как WWVB, DCF77, HBG, MSF и др., все еще используются большим числом потребителей, имеющих приемники кода времени, которые автоматически синхронизируются по этим передачам с миллисекундной точностью. Синхронизация по фазе несущей частоты была приостановлена в связи с периодической неоднозначностью и помехами между некоторыми из этих станций;
- система Logan-C позволила внедрить полностью автоматизированные приемники, которые устраняют проблему опознавания периодов несущей. Logan-C продолжает широко использоваться, оставаясь лучшим методом сличения для тех целей, где погрешности в несколько десятых долей микросекунды, обусловленные, помимо прочего, сезонными изменениями фазы несущей [De Jong, 1984], являются приемлемыми или где при приеме существует поверхностная волна (большая часть Северного полушария); см. [Potts и Weider, 1972] и Отчет 271. Передача из Аллуи на 162 кГц (Франция) надежно принимается на всей территории континентальной Франции и дает возможность контролировать частоты генератора с точностью 10^{-7} с/т с ограничением около 5×10^{-13} , где τ — время наблюдения в секундах [Dubouis, 1986];
- службы ВЧ, SF и TS остаются основным источником времени для судов, радиолюбителей и других пользователей, которые ценят очень низкую плату и которых удовлетворяют погрешности в несколько миллисекунд [Ogawa, 1958]; см. также [Iijima и др., 1978]. CSAO предложила новый метод приема ВЧ сигналов времени, который дает возможность пользователю получать точность синхронизации $\pm 1,5$ мс [Fan Rong Mei, 1986];
- перевозимые часы, которые в ходе всемирных экспериментов продемонстрировали возможность синхронизации с погрешностью в десятки наносекунд [Hafele и Keating, 1972], скорее всего, будут менее широко использоваться в будущем из-за конкуренции со стороны высокоточных спутниковых методов, таких как GPS или коммерческие широкополосные спутниковые линии.

3.2 Телевидение

Телевидение является своеобразной электронной системой времени и как таковое может быть использовано для сличений времени. В силу существования различных систем, таких как NTSC, PAL, SECAM и др., а также из-за сложностей в определении задержки распространения сигналов при каждом сличении, в особенности на большие расстояния, этот метод нашел наибольшее применение при одновременном приеме передач в пределах зоны охвата передатчика. Новым и многообещающим методом является прием спутниковых телевизионных программ, если информация о местоположении спутника может быть получена каким-нибудь способом (от органов, эксплуатирующих спутниковую систему) с достаточной точностью. Были проведены расширенные испытания между станциями в Австрии, Нидерландах, Соединенном Королевстве и ФРГ [De Jong, 1984]. В США широкое использование кадровых синхронизаторов положило конец применению телевидения для целей синхронизации на больших расстояниях, потому что эти устройства запоминают и хранят полный кадр и формируют его для передачи с опорным сигналом времени на местные часы. Для получения более детальной информации (в пределах местной зоны охвата) см. Отчеты 1016 и 897.

3.3 Межконтинентальная синхронизация часов с помощью VLBI

Принципы VLBI были описаны Клемперером [1972], который также дал обширный список эталонов, основные точные значения и ограничения. Кларк [1972] также рассмотрел основные принципы VLBI и перечислил ряд текущих экспериментальных программ VLBI. Точность при сличении частот от 10^{-13} до 10^{-14} и точность синхронизации часов порядка 1 нс вполне достижимы.

Ширина полосы частот 10—100 МГц, требуемая для синхронизации часов с разрешающей способностью 1—10 нс, достигается методом синтеза ширины полосы частот, описанным Хинтереггером и др. [1972] и Роджерсом [1970].

В принципе, для синхронизации часов не требуется стабильность водородных мазеров; в действительности при демонстрации опытных систем использовались рубидиевые генераторы. Серия из трех экспериментов была проведена между станциями НАСА в Мадриде (Испания) и Голдстоне (Калифорния) [Hurd, 1972]. Несмотря на то что при измерениях достигнута разрешающая способность 50—500 нс (1σ), в зависимости от количества используемых данных, точность полученной разницы между часами может быть проверена только в пределах 10 мкс.

Если имеется достаточное количество данных и может быть получена достаточно большая ширина полосы частот (50 МГц), тогда метод синхронизации VLBI представляется ограниченным главным образом по точности из-за сложностей в определении полной системной задержки, и в частности атмосферной задержки и задержки в приемнике.

В целях точного определения разницы задержки в VLBI приемниках в 1986 и 1987 годах Научно-исследовательская лаборатория связи (CRL) (Япония) в сотрудничестве с USNO провела эксперименты по интерферометрии с нулевой базой (ZBI) как на станции VLBI Касима, так и на станции Ричмонд Военно-морской обсерватории США (USNO) [Нама и др., 1987; Kiuchi и др., 1987]. Было рассчитано, что точность метода ZBI составляет около 0,3 нс с учетом наихудшего случая систематических погрешностей от 0,1 до 0,2 нс для позиций радиисточников и для используемого вектора длины базы.

3.4 Спутники

Экспериментальные сличения разнесенных на большие расстояния шкал времени через искусственные спутники успешно проводятся с 1962 года. Используются как односторонние, так и двусторонние методы, и каждый из них имеет свои определенные преимущества. В одностороннем режиме пользователь легко принимает сигнал времени, который либо генерируется находящимися на борту часами, либо передается пользователю из другого наземного пункта через спутниковый передатчик. Так как пользователю не нужно передавать сигналы, может быть использовано простое оборудование; кроме того, в вещательном режиме может быть одновременно обслужено большое число пользователей. Однако, поскольку задержка распространения сигналов должна определяться путем вычислений или калибровки с использованием какой-либо другой техники, односторонняя передача времени, как правило, характеризуется большими погрешностями по сравнению с двусторонними методами. В зависимости от метода и стоимости эксперимента, могут быть получены погрешности от нескольких микросекунд до нескольких наносекунд.

Двусторонний метод включает в себя обмен синхронизирующими сигналами между двумя наземными пунктами с использованием спутникового передатчика для почти одновременной передачи сигналов туда и обратно. В данном случае требуется более сложное оборудование, так как пользователь должен также осуществлять передачу сигналов. Однако, как правило, из-за наличия возможностей для непосредственного измерения, а следовательно, и компенсации задержки распространения, достигаются небольшие погрешности в передачах времени. Двусторонний метод предоставляет возможность использования этих современных передач времени небольшому числу избранных пользователей, которым необходим высокий уровень характеристик. Примеры можно найти среди большого числа экспериментов со спутниками «Симфония».

Более полные описания, сравнения и ссылки, относящиеся к этим и другим спутниковым методам или системам, можно найти в Отчете 518.

3.5 Другие методы

Различные методы сличения времени могут использоваться в сочетании. В Федеративной Республике Германии телевизионные сигналы используются вместе с сигналами времени и стандартными частотами, передаваемыми НЧ передатчиком DCF77. НЧ маркер секунды позволяет осуществлять идентификацию телевизионного сигнала. Этот сигнал, в свою очередь, помогает идентифицировать период несущей частоты DCF77 [Becker и др., 1973]. НЧ и ОНЧ сигналы могут быть использованы, если они передаются синхронизированно.

В качестве средства синхронизации было предложено использовать линии электропередач. Испытания, проведенные в Федеральном физико-техническом институте (PTB) и в Италии, показали, что точность обычно составляет 0,25—0,5 мс для расстояния 200 км с возможностью фазовых скачков, обусловленных переключениями линий [Becker и Enslin, 1973; Angelotti и Cordare, 1974]. Аналогичные результаты были получены в США даже на трассах протяженностью свыше 2000 км [Allan и др., 1972].

Сличение шкал времени с использованием телефонных линий — простой и не требующий больших затрат метод. Эксперименты проводились в Японии Исследовательской лабораторией по радио (RRL) (в настоящее время — Научно-исследовательская лаборатория связи (CRL)) с использованием акустического устройства связи на местной телефонной линии и на линии телефонной связи протяженностью 800 км. Были выполнены измерения времени приема и времени прохождения сигналов в прямом и обратном направлениях для различных несущих частот, используемых для режимов вызова-ответа устройств связи; результаты были усреднены. Была получена точность в пределах $\pm 0,1$ мс как для местной сети, так и для сети большой протяженности [МККР, 1982—86]. Этот метод может применяться только в том случае, если два пути распространения сигналов равны.

С 1988 года код времени в Австрии стал распространяться через телефонные модемы. Он состоит из ряда символов кода ASCII, содержащих сведения о дате и времени (UTC и местное время), а также дополнительную предварительную информацию о введении дополнительной секунды или переходе с зимнего на летнее время. Кроме того, он обеспечивает возможность внесения дополнительной информации, необходимой пользователю.

Такая передача может быть использована для настройки часов, компьютеров или автоматических измерительных систем. Задержка сигнала и флуктуация времени задержки главным образом зависят от рабочего режима модема. В Рекомендации V.23 МККТТ задержка сигналов в модемах примерно равна 5 мс с флуктуацией менее 100 мкс; в Рекомендации V.22 МККТТ аналогичными цифрами являются 60 и 3 мс, соответственно. В настоящее время измерение задержки распространения сигналов не предусматривается [Kirchner, 1989].

В NRC (Канада) и USNO (США) с 1986 года работают аналогичные системы, в которых в оборудовании пользователя предусмотрена возможность предварительного расчета задержки кода времени с точностью около миллисекунды [Jackson и др., 1986].

С 1988 года в США работает система NIST, которая предварительно рассчитывает задержку сигналов для каждого пользователя, так что код времени поступает в пункт пользователя вовремя и с точностью около миллисекунды [Levine и др., 1989].

С 1979 года Национальный электротехнический институт (IEN) в Италии обеспечивает Итальянскую радиовещательную компанию (RAI) кодированным частотно-модулированным звуковым сигналом времени [Leschiutta и Pettiti, 1979], который широко используется для автоматической синхронизации дистанционно управляемых часов. Этот метод позволяет синхронизировать часы с точностью, большей чем 1 мс. Использование этих кодированных сигналов времени для дистанционного управления генераторами с малым дневным уходом частоты может обеспечить прогнозирование UTC (IEN) в пределах $\pm 1 \times 10^{-10}$, если данные синхронизации, применяемые для расчета частотных параметров генераторов, берутся за соответствующий период времени (> 2 дней) [F. Cordara и др., 1987].

Были проведены эксперименты [Norton и др., 1962] по определению нестабильности, вносимой при распространении сигналов по СВЧ линии связи прямой видимости протяженностью 50 км. Ухудшение стабильности фазы передаваемой волны, обусловленное распространением, обычно менее важно, чем флуктуации в сигнале, вызванные шумом генератора. Для измерительного интервала времени 1 с вклад нестабильности, обусловленной распространением, определяется нормализованной стандартной погрешностью около 3×10^{-12} , которая уменьшается до 1×10^{-14} при увеличении времени усреднения до 10^6 с.

В СССР двусторонние эксперименты по синхронизации шкал времени проводились на трассе протяженностью 750 км между Москвой и Харьковом путем измерения переданных на частоте 72 МГц сигналов, отраженных от метеорных следов [Дудник и др., 1971; 1973]. С помощью передатчиков мощностью 40 кВт были проведены 5620 успешных сеансов синхронизации шкал времени. После компенсации измеренной задержки распространения точность синхронизации составила 0,1—0,2 мкс. Возможные различия задержек в оборудовании в прямых и обратных каналах передачи считаются основными источниками погрешности.

В дальнейшем была проведена значительная модернизация. Начиная с 1987 года в СССР регулярно используются 6 линий радиометеорной синхронизации, и они обеспечивают сличения шкал времени на расстояниях 600—2200 км. Двусторонний метод синхронизации в настоящее время использует частоту 57 Гц для сличений шкал времени. Погрешность сличений шкал времени на расстояниях 750—1200 км (Москва—Харьков, Москва—Ужгород), которая была определена с помощью перевозимых квантовых часов, составила 20—30 нс [Дудник и др., 1986].

В течение 1974 года во Франции проводились эксперименты для определения погрешности синхронизации часов, разнесенных на 6 км, с использованием двусторонней передачи лазерных сигналов в целях компенсации задержки распространения. В одной из серий экспериментов расхождение во времени сравниваемых часов было определено с погрешностью 4 нс. При использовании более совершенных лазерных детекторов на трассе 300 м погрешности были снижены до менее чем 1 нс [Sannier, 1974; Besson, 1974; Besson и Parcelier, 1974]. Дальнейшие усовершенствования были внесены в оборудование контроля сигналов синхронизации, что привело к повышению разрешающей способности всей приемопередающей системы до 100 пс [Moreau, 1977].

В 1977 году Франция и Испания провели совместный эксперимент по сличению шкал времени обсерваторий Парижа (OP) и Сан-Фернандо (OMSF) с использованием пролетавшего над ними самолета, оборудованного уголковыми отражателями, лазерными излучателями и часами. Разность между UTC(OP) и UTC(OMSF) была определена в пределах 20 нс [Benavente и др., 1979].

ТАБЛИЦА I — Сравнение методов передачи времени (по состоянию на 1985 год)

Система/Метод	Охват	Стоимость оборудования (в тыс. долл. США)	Характеристика	Примечания
Omega (ОНЧ)	Всемирный	5—25	2 мкс	Эталон частоты
Logan-C (НЧ)	Региональный, Северное полушарие	3 1 10	1 мкс 100 нс—2 мкс ⁽¹⁾ 100 нс ⁽¹⁾	Автоматический, код времени Ручное управление Автоматический
НЧ сигнал времени	Всемирный	0,2	1 мс	Подготовка оператора
GOES	Америка	4	50 мкс	Автоматический, код
TRANSIT	Всемирный	14	10—25 мкс	Автоматический, код
GPS	Всемирный	25	10 нс	Автоматический, код
Спутник связи	От пункта к пункту	100	1 нс	Двусторонний, передача/прием

⁽¹⁾ Исключая путь распространения пространственной волны и сухопутный путь распространения.

ССЫЛКИ

- ALLAN, D. W., DAVIS, D. D. WEISS, M., CLEMENTS, A., GUINOT, B., GRANVEAUD, M., DORENWENDT, K., FISCHER, B., HETZEL, P., AOKI, S., FUJIMOTO, M. K., CHARRON, L. and ASHBY, N [June 1985] Accuracy of international time and frequency comparisons via global positioning system satellites in common-view. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-34, 2, 118—125.
- ALLAN, D. W., MACHLAN, H. E. and MARSHALL, J. [6—8 June 1972] Time transfer using nearly simultaneous reception times of a common transmission. Proc. 26th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 309—316 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).
- ALLAN, D. W. and WEISS, M. A. [May 1980] Accurate time and frequency transfer during common-view of a GPS satellite. Proc. 34th Annual Symposium on Frequency Control, Philadelphia, PA, USA (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 334—347 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).
- ANGELOTTI, E. and CORDARE, F. [1974] IEN time and frequency dissemination. Proc. Time Determination, Instrumentation and Synchronization, Cagliari, 207—233.
- BECKER, G. and ENSLIN, H. [1973] Zeitübertragung mit dem Wechselstromnetz (Time transmission using the main power network). *PTB Jahresbericht*, 135.
- BECKER, G., FISCHER, B. and HETZEL, P. [1973] Methoden zum Vergleich und zur Verbreitung von Zeitskalen (Methods of comparison and diffusion of time signals). *Kleinheubacher Berichte*, 16, 5.
- BENAVENTE, J., BESSON, J. and PARCELIER, P. [1979] Clock comparison by laser in the nanosecond range. *Radio Sci.*, Vol. 14, 4, 701—706.
- BESSON, J. [1974] Synchronisation d'horloges à quelques nanosecondes par l'ONERA. *C.R. Acad. Sci.*, (Paris), Vol. 279.B., 147—150.
- BESSON, J. and PARCELIER, P. [16—20 September 1974] Synchronisation dans le domaine de la nanoseconde d'horloges éloignées. IX^e Congrès International de Chronométrie, Stuttgart, Federal Republic of Germany. Edition provisoire, TP ONERA No. 1397.
- CLARK, T. A. [14—16 November 1972] Precision timing and very long baseline interferometry (VLBI). Proc. 4th Annual NASA and Dept. of Defense Precise Time and Time Interval (PTTI) Planning Meeting, GSFC Rep. X-814-73-72, 74—89, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md., USA.
- CORDARA, F., PETTITI, V. and DE GIORGI, P. [March 1987] Remote oscillators frequency control by means of coded time signals. Proceedings of the 1st European Time and Frequency Forum, Besançon, 79—83.
- DE JONG, G. [1984] Results of several years of comparison of European time scales by means of receive only satellite methods. CPEM Digest. Delft Library of Congress. Card No. 75—23855, and IEEE Cat. No. 84ch 2057-8.
- DIXON, R. C. [1976] *Spread Spectrum Systems*. John Wiley and Sons Inc., New York, NY, USA.
- DUBOUIS, B. [April 1986] Réception de la fréquence porteuse de France Inter-Asservissement en fréquence et en phase d'oscillateurs. Bulletin du bureau national de métrologie. Vol. 17, 63—64, 86—90.
- ДУДНИК В.С., КАЩЕЕВ Б.Л., ЛЕЙКИН А.Ю., СМЕРНОВ А.Н., СОПЕЛЬНИКОВ М.Д. [1971] Использование метеорного распространения радиоволн для привязки часов пунктов службы времени и частоты. *Измерительная техника*, 12.
- ДУДНИК В.С., КАЩЕЕВ Б.Л., СМЕРНОВ А.Н. [1973] Использование отраженных радиоволн для калибровки каналов привязки шкал времени. *Измерительная техника*, 6.
- ДУДНИК В.С., КАЩЕЕВ Б.Л., КОВАЛЬ Ю.А., ЛЕМАН Ю.А., СЕМЕНОВ С.Ф., СОПЕЛЬНИКОВ М.Д., ТКАЧУК А.А. [1986] Новый комплекс аппаратуры для сличений эталонов времени и частоты по радиометеорным каналам. *Измерительная техника*, 4.
- FAN RONG MEI [1986] Scanning and display technique with time markers for frequency calibration and timing. Publications of Shaanxi Observatory, Vol. 9, No. 1.
- GUINOT, B. [1968] Bureau international de l'heure, Rapport annuel (BIH Annual Report).
- GUINOT, B. [1969] Formation de l'échelle de temps coordonnée par le Bureau international de l'heure (Formation of the coordinated time scale by the Bureau international de l'heure). Actes du Colloque International de Chronométrie, Série A.
- HAFELE, J. C. and KEATING, R. E. [July 1972] Around the world atomic clocks: observed relativistic time gains. *Science*, Vol. 177, 166—170.
- HAMA, S., YOSHINO, T., KIUCHI, H., MORIKAWA, T., SATO, T., TAKAHASHI, F., SHIOMI, T. and KLEPCZYNSKI, W. [1987] First international time comparison experiment using VLBI. *J. of RRL*, No. 142, 85—93.

- HINTEREGGER, H. F., SHAPIRO, I. I., ROBERTSON, D. S. KNIGHT, C. A., ERGAS, R. A., WHITNEY, A. R., ROGERS, A. E. E., MORAN, J. M., CLARK, T. A. and BURKE, B. F. [27 October 1972] Precision geodesy via radio interferometry. *Science*, Vol. 178, 396—398.
- HURD, W. J. [14—16 November 1972] An analysis and demonstration of clock synchronization by VLBI. Proc. 4th Annual NASA and Dept. of Defense Precise Time and Time Interval (PTTI) Planning Meeting, GSFC Rep. X-814-73-72, 100—122. Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md., USA.
- IJIMA, S., SHIBUTANI, G. and SAKAI, T. [1978] Travel time and accuracy of reception of remote time signals on short waves, WWV and WWVH as received in Tokyo. *Tokyo Astron. Bull.*, 2nd Series, Vol. 253, 2917—2923.
- JACKSON, D. and DOUGLES, R. J. [1986] A telephone-based time dissemination system. Proc. 18th PTTI Applications and Planning Meeting, Washington, DC, 541—552.
- KIRCHNER, D. [1989] Genaue Zeit für Rechner über Telefonmodems (Precise time dissemination over telephone modem for computers). Berichte der Informationstagung Mikroelektronik 89, Wien, 103—108.
- KIUCHI, H., AMAGAI, J., HAMA, S., TAKAHASHI, Y., YOSHINO, T., KAWAGUCHI, N. and KURIHARA, N. [1987] Instrumental delay calibration by zero baseline interferometry for international VLBI time comparison. *J. of RRL*, No. 143, 115—139.
- KLEMPERER, W. K. [May 1972] Long-baseline radio interferometry with independent frequency standards. *Proc. IEEE*, Vol. 60, 602—609.
- LESCHIUTTA, S. and PETTITI, V. [September 1979] Distribution of a coded standard time information via broadcasting stations (10^e Congrès International de Chronométrie, Genève).
- LEVINE, J., WEISS, M., DAVIS, D., ALLAN, D. and SULLIVAN, D. I. [1989] The NIST automated computer time service. *NIST journal of research*.
- MOREAU, J. P. [1977] Mesure de décalages entre horloges éloignées à haut pouvoir de résolution. *Mesures*.
- NORTON, K. A., BARROWS, E., THOMPSON, Jr. M. C. and JAMES, H. B. [December 1962] Variance of radio frequency caused by turbulence on line-of-sight transmissions. *IRE Trans. P.G.I.*
- OGAWA, T. [December 1958] Frequency variations in short-wave propagation. *Proc. IRE*, Vol. 46, 12, 1934—1939.
- POTTS, C. E. and WIEDER, B. [May 1972] Precise time and frequency dissemination via the LORAN-C system. *Proc. IEEE*, Vol. 60, 5, 530—539.
- ROGERS, A. E. E. [October 1970] Very long baseline interferometry with large effective bandwidth for phase delay measurements. *Radio Sci.*, Vol. 5, 1239—1248.
- SANNIER, P. [1974] Synchronisation d'oscillateurs ultrastables au moyen d'un faisceau laser. Note technique ONERA No. 226.
- STEIN, S. R., KAMAS, G. and ALLAN, D. W. [December 1983] New time and frequency services at the National Bureau of Standards. Proc. 15th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA, 17—29.
- WHEELER [1983] Automation of precise time reference stations (PTRS). Proc. 15th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA, 41—52.

Документы МККР

[1982—86]: 7/2 (Япония).

ЛИТЕРАТУРА

- BAKER, D. M. and DAVIES, K. [January 1968] Waves in the ionosphere produced by nuclear explosions. *J. Geophys. Res.*, Vol. 73, 448.
- BARNES, J. A. [June 1967] The development of an international atomic time scale. *Proc. IEEE*, Vol. 55, 822—826.
- BECKER, G., FISCHER, B. and KRAMER, G. [1969] Methoden und Ergebnisse im internationalen Zeitvergleich mit Längstwellen (Methods and results in international time comparison with very low frequencies). Actes du Colloque International de Chronométrie, Série A.
- BEEHLER, R. E., MOCKLER, R. C. and RICHARDSON, J. M. [July 1965] Caesium beam atomic frequency standards. *Metrologia*, Vol. 1, 114—131.
- BESSON, J. and CUMER, J. [1969] Synchronisation précise de base par simple survol (Accurate basic synchronization by simple overflying). Actes du Colloque International de Chronométrie, Série D.
- BLAIR, B. E. [April 1973] Time and frequency dissemination: an overview of principles and techniques. US National Bureau of Standards Monograph 140, Chapter 10, 223—313.
- BLAIR, B. E., CROW, E. L. and MORGAN, A. H. [June 1967] Five years of VLF worldwide comparison of atomic frequency standards. *Radio Sci.*, Vol. 2 (New Series), 627—636.

- BONANOMI, J., KARTASCHOFF, P., NEWMAN, J., BARNES, J. A. and ATKINSON, W. R. [April 1964] A comparison of TAI and NBS-A atomic time scales. *Proc. IEEE*, Vol. 42, 4, 439.
- CHAN, K. L., KANELAKOS, D. P. and VILLARD, O. G., Jr. [May 1962] Correlation of short-period fluctuations of the earth's magnetic field and instantaneous frequency measurements. *J. Geophys. Res.*, Vol. 67, 1975.
- DAVIES, K. and BAKER, D. M. [1965] Ionospheric effects observed around the time of the Alaskan earthquake of March 28, 1964. *J. Geophys. Res.*, Vol. 70, 2251.
- DAVIES, K., WATTS, J. M. and ZACHARISEN, D. H. [1962] A study of F_2 -layer effects as observed with a Doppler technique. *J. Geophys. Res.*, Vol. 67, 601.
- FUJIMOTO, M. K. and FUJIWARA, K. [1981] Measurements on phase delay of a LORAN-C antenna. *Tokyo Astron. Bull.*, 2nd Serie, 265, 3015—3020.
- GEORGES, T. M. [1968] HF Doppler studies of travelling ionospheric disturbances. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 30, 735.
- GUETROT, A., HIGBIE, L. S., LAVANCEAU, J. and ALLAN, D. W. [May 1969] Proc. 23rd Annual Symposium on Frequency Control, Atlantic City, NJ, USA (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703) (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).
- HELLWIG, H. and WAINWRIGHT, A. E. [December 1975] A portable rubidium clock for precision time transport. Proc. 7th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA, 143—159.
- ICHINOSE, T. and OGAWA, T. [May 1976] Internal gravity waves deduced from the HF Doppler data during the April 19, 1958, solar eclipse. *J. Geophys. Res.*, Vol. 81, 2401.
- KALAU, M. [1980] The GDR atomic time scale. Conf. Precision Electromagnetic Measurements (CPEM), Braunschweig, Federal Republic of Germany. IEEE Catalogue No. 80CH1497-71M, 11—14.
- KOBAYASHI, S., SATOH, T. and TANAKA, M. [July 1977] Accuracy of time comparison by the reception of JJY signals propagating via E region. *J. Radio Res. Labs. (Japan)*, Vol. 24, 114.
- LESCHIUTTA, S., ORLANDO, A. and PORRECA, A. [1968] Sincronizzazione di orologi campione tramite segnali di tempo radiodiffusi. Proc. Colloquium on the Problems of the Time Determination, Keeping and Synchronization, Milano, 321—329.
- MORGAN, A. H., CROW, E. L. and BLAIR, B. E. [July 1965] International comparison of atomic frequency standards via VLF radio signals. *Radio Sci. J. Res. NBS/USNC-URSI*, Vol. 69D, 7, 905—914.
- MUNGALL, A., DAAMS, H. and BAILEY, R. [July 1969] Note on atomic time-keeping at the National Research Council. *Metrologia*, Vol. 5, 3, 73—76.
- OGAWA, T. [1960] Ionosphere observations by Doppler effect. *Rep. Ion. and Space Res. Japan*, Vol. 14, 133.
- TSUTSUI, M. and OGAWA, T. [1973] HF Doppler observation of ionospheric effects due to typhoons. *Ion. Space Res. (Japan)*, Vol. 27, 121.
- WINKLER, G. M. R. [1972] Recent experiments with flying atomic clocks, LORAN-C etc. for clock synchronization. Report to XVII General Assembly, URSI, Warsaw, People's Republic of Poland.
- YASUDA, Y., OKAZAWA, H., AKATSUKA, K. and MATSUURA, T. [1977] International time and frequency comparison for long term via VLF and LORAN-C. Proc. 9th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Greenbelt, Md., USA.

Документы МККР

- [1974—78]: 7/137 (Китайская Народная Республика); 7/125 (Швейцария); 7/106 (Соединенное Королевство).
 [1978—82]: 7/91 (Япония).

ОТЧЕТ 518-5

КООРДИНАЦИЯ И ПЕРЕДАЧА ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ ЧЕРЕЗ СПУТНИКИ

(Вопрос 2/7)

(1971—1974—1978—1982—1986—1990)

1. Введение

В настоящее время пользователи частотно-временной информации имеют доступ к множеству самых разных служб и методов распространения такой информации. К ним относятся: хорошо известные вещательные службы в ВЧ, НЧ и ОНЧ диапазонах, находящиеся в ведении большого числа различных администраций всего мира; методы передачи шкал времени с помощью перевозимых часов; использование телевизионных и радионавигационных сигналов в качестве стандартов для передачи шкал времени и частоты; телефонные службы времени и спутниковые методы. Точность, достигаемая при использовании этих методов, может находиться в диапазоне от миллисекунд до субмикросекунд, в зависимости от таких факторов, как конкретный используемый метод, соответствующее географическое положение, условия распространения радиоволн и т. д. (Отчеты 267, 271 и 363).

Хотя существующие службы могут удовлетворить многие из потребностей сегодняшних пользователей в частотно-временной информации, появляются все новые и новые области измерений, которые требуют или могут получить преимущества в результате использования эталонных сигналов частоты и времени повышенной точности и надежности с более широкой зоной охвата. Например, быстрое развитие технологии в таких областях, как высокоточная навигация, определение местоположения, цифровая связь, мониторинг научных данных и космические программы, вызвало необходимость в синхронизации и взаимных сличениях шкал времени на больших географических территориях с точностью до наносекунды или выше. Более того, многолетний анализ долгосрочных тенденций в области хранения времени и смежных областях ясно указывает на то, что в последующие 20 лет требования к точности передач шкал времени возрастут и появятся новые требования.

Хотя существующие службы времени и частоты, безусловно, способны к некоторому дальнейшему совершенствованию, накопленный на сегодняшний день опыт свидетельствует о том, что спутниковые методы передач могут предоставить наибольшую возможность для значительного усовершенствования служб координации и передачи времени и частоты в будущем. В настоящее время существует целый ряд самых разных спутниковых методов и систем, требующих рассмотрения, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки для конкретных нужд и областей применения.

В разделе 2 настоящего Отчета рассматриваются некоторые из существующих и возникающих потребностей в совершенствовании методов координации и передачи. В разделе 3 кратко излагаются некоторые общие преимущества использования спутниковых методов. В разделе 4 обсуждаются наиболее перспективные варианты спутниковых систем и проводится их сравнение в отношении используемых методов, статуса на данный момент, зоны охвата, точности, оценки затрат пользователя, возможностей для использования на месте, экспериментального или действующего характера систем и наиболее важных преимуществ и недостатков. Кроме того, дается краткая информация о накопленном на сегодняшний день опыте и приводятся некоторые наметки планов на будущее для каждой системы или каждого метода.

2. Некоторые области применения, которые могут получить преимущества в результате совершенствования методов передач времени и частоты

В различных лабораториях мира уже разработаны атомные стандарты частоты с документированными уровнями погрешности порядка 1×10^{-13} и долговременной стабильностью, лучшей чем 1×10^{-14} (Отчет 364). Атомные шкалы времени, основанные на таких стандартах частоты, имеют отклонения менее чем 10 нс в сутки. Чтобы такие шкалы времени, хранимые в различных национальных лабораториях, принесли максимальную пользу во всех широко распространенных областях применения частотно-временной информации, необходимо внедрить методы сличений шкал времени на уровне субнаносекунды и методы передачи соответствующих эталонных сигналов пользователям.

Еще одна возможная область применения усовершенствованных методов передачи частотно-временной информации — цифровая связь. Наблюдается устойчивая тенденция к созданию синхронизированных цифровых сетей, которые в ряде случаев, скорее всего, будут, реализованы с использованием многочисленных атомных стандартов частоты, обеспечивающих необходимую стабильность во времени для поддержания бит-синхронизма в сетях связи. Например, для работы сети со скоростью 1,5 Мбит/сек и поддержания бит-синхронизма на уровне 1 бит в сутки требуется эталон частоты со стабильностью 1×10^{-11} . Поскольку обычная скорость связи в будущем возрастет, то требования к эталонам времени и частоты также станут более жесткими. В других системах используются спутниковые линии связи в режиме многостанционного доступа с временным разделением каналов (TDMA), при этом требуется синхронизация времени с погрешностью 10 нс.

В общей области перевозок, и в частности в области навигации/определения местоположения, разрабатываются требования, касающиеся повышения точности синхронизации до уровня 10 нс, а в некоторых случаях — до уровня лучше чем 1 нс. В перспективе, например, планируется использовать глобальные спутниковые навигационные системы, обеспечивающие точность определения местоположения в несколько метров за счет применения атомных стандартов частоты, стабильность которых составляет 1×10^{-13} , а точность синхронизации — 10 нс. Навигационные требования к будущим планетарным космическим зондам включают необходимость в синхронизации с точностью, лучшей чем 1 нс. В различных специализированных морских областях применения, требующих точного определения местоположения, таких как дноуглубительные работы, прокладка труб, укладка кабеля, подъем затонувших судов, изыскание нефти, геофизика и гидрография, требуется высокая точность синхронизации, в некоторых случаях порядка 1 нс. Другие потребности в более высокой точности передачи времени и частоты связаны с постоянным развитием систем и методов упорядоченного по времени управления воздушным движением. В будущих системах, вероятно, будут использоваться цифровые линии передачи данных «воздух—Земля» для интеграции аэронавигации, связи, эшелонирования воздушных судов и управления потоком движения.

В космических областях применения [Cooper и Chi, 1979] возникает необходимость в расширении возможностей передачи времени и частоты, по мере того как разрабатываются и внедряются более совершенные методы слежения за спутниками и проведения геодезических измерений с помощью спутников. В настоящее время спутники могут отслеживаться на глобальной основе с общей погрешностью в несколько метров. Лазерные дальнометры работают с погрешностью, составляющей всего лишь несколько сантиметров, а это означает, что может быть достигнута разрешающая способность по времени на уровне субнаносекунд.

В некоторых предъявляющих более высокие требования к точности областях применения, которые, как ожидается, получат развитие в 80-х годах в прикладной спутниковой геодезии, будет необходима точность синхронизации на уровне 0,1—1 нс.

Очень многие научные области могут получить преимущества за счет совершенствования возможностей передачи частотно-временной информации. Для проведения значительно лучших экспериментов по теории относительности могут потребоваться эталоны частоты со стабильностью 1×10^{-16} за несколько часов, а стабильность частоты лучше чем 1×10^{-14} за период до 1 суток содействовала бы работе с интерферометрами с сверхдлинной базой (VLBI). Точно так же для измерения напряжения земной коры и континентального дрейфа требуется стабильность времени 1 пс за интервал 1000 с. И как последний пример, наличие более точных эталонных сигналов времени и частоты обеспечит возможность для более совершенного моделирования тропосферы и ионосферы, что, в свою очередь, может оказать благотворное влияние на многие другие области, где на конечном результате сказываются погрешности распространения.

Многие другие области, где необязательно нужны исключительно высокая точность или разрешающая способность, тем не менее могут выиграть от совершенствования возможностей службы передачи времени и частоты, но в других аспектах, таких как более широкая зона охвата, более надежный прием, уменьшение помех, удобство пользования для неспециалистов и меньшие затраты. В качестве примера можно привести системы мониторинга научных данных, где данные, поступающие из различных разнесенных пунктов, должны быть коррелированы, и электрические сети, где эталоны времени и частоты необходимы для координации и контроля потока электроэнергии в сети, хронирования событий и обнаружения и анализа повреждений.

Многие из указанных здесь конкретных требований — это эксплуатационные требования к времени и частоте, где цифры выбраны таким образом, чтобы этот источник ошибок не стал ограничивающим фактором в бюджете ошибок всей системы. Вероятно, стоит также отметить, что весьма желательно поддерживать технические возможности стандартов времени и частоты на уровне, примерно в 10 раз превышающем эксплуатационные требования.

3. Общие преимущества спутниковых методов

Используемые в настоящее время методы передачи частотно-временной информации, которые, как правило, доступны для большинства пользователей, по-видимому, не имеют потенциальных возможностей для удовлетворения обсуждавшихся выше потребностей. Возможности служб НЧ, ВЧ и ОНЧ ограничены эффектами распространения, и, основываясь на многолетнем опыте, вряд ли можно рассчитывать на то, что они смогут предложить более высокую точность передачи шкал времени, чем та, что достижима на сегодняшний день. Передача шкал времени с использованием телевизионных сигналов осуществляется с точностью на уровне 10 нс, но только в локальных зонах, где оба временных пункта находятся в пределах прямой видимости в общей зоне приема сигналов одной и той же телевизионной станции. При телевизионных сличениях на больших расстояниях с использованием взаимосвязанных телевизионных сетей наблюдается значительное ухудшение (до нескольких микросекунд) результатов синхронизации из-за дополнительных погрешностей на трассе распространения. Метод сличения с помощью перевозимых часов позволяет получить гораздо лучшие результаты (50 нс), правда, при соблюдении особых предосторожностей, однако и это не является практическим решением более общих проблем синхронизации.

С другой стороны, спутниковые методы передачи частотно-временной информации обладают потенциальными возможностями для удовлетворения потребностей в более высокой точности и других усовершенствованиях, о которых говорилось выше. В большинстве спутниковых методов передач значительно снижены погрешности, обусловленные трассой распространения сигнала, поскольку используемые трассы Земля—спутник или спутник—Земля пролегают в основном в свободном космосе с минимальными ионосферными и тропосферными возмущениями. Использование более высоких частот, например более 1 ГГц (что обычно применяется во многих спутниковых системах), также приводит к снижению доли вызванных влиянием ионосферы погрешностей в общей задержке на трассе распространения. В случае использования двустороннего метода синхронизации через спутник, когда два пункта одновременно (или почти одновременно) обмениваются сигналами времени с помощью спутника, в принципе, нет необходимости определять задержки на трассе распространения, которые не влияют напрямую на точность передачи шкал времени.

Спутники имеют также большие преимущества по зоне покрытия в силу своего положения над Землей. Один спутник, находящийся на геостационарной орбите, может, например, непрерывно передавать или ретранслировать сигналы времени почти на $1/3$ территории Земли. Точно так же один спутник на низкой полярной орбите может обеспечить полный глобальный охват, хотя и не на непрерывной основе, для каждой заданной точки Земли. В общем, надежность приема спутниковых сигналов очень высока в любой точке зоны охвата, поскольку возмущения в среде распространения имеют здесь намного меньшее значение по сравнению с передачей частотно-временных сигналов наземными средствами.

На основе большого числа разнообразных спутниковых экспериментов и оценок, выполненных с помощью различных спутниковых систем, можно разработать сравнительно недорогую, высокоавтоматизированную приемную аппаратуру, которой без труда могут пользоваться неспециалисты. Однако для достижения наивысшей возможной точности, вероятно, будет необходимо использовать более дорогую и более сложную аппаратуру, для работы с которой потребуются высококвалифицированные специалисты.

Эксперименты по передаче шкал времени через спутники успешно проводились рядом организаций во всем мире начиная с 1962 года. Хотя в настоящее время нет таких спутников, которые предназначались бы исключительно для целей передачи времени и частоты, и вряд ли они появятся в будущем, экспериментаторам удалось с максимальной эффективностью использовать спутниковые системы, первоначально предназначенные для других целей и областей применения. В их число входят навигация, связь, телевизионное вещание, метеорологические, научные и экспериментальные спутниковые системы. В приложении I в табличной форме приводится информация о ряде экспериментов с использованием спутников, которые проводились с 1962 года.

Признавая необходимость в усовершенствованных службах и учитывая возможности спутниковых методов для удовлетворения указанных потребностей, Всемирная административная радиоконференция (Женева, 1979 г.) распределила спутниковой службе передачи времени и частоты следующие полосы частот:

400,1 $\pm$ 0,025 МГц
 4202 $\pm$ 2 МГц (космос—Земля)
 6427 $\pm$ 2 МГц (Земля—космос)
 13,4—14 ГГц (Земля—космос)
 20,2—21,2 ГГц (космос—Земля)
 25,25—27 ГГц (Земля—космос)
 30—31,3 ГГц (космос—Земля)

4. Варианты спутниковых систем или методов для совершенствования передач частотно-временной информации и координации

При обсуждении различных вариантов спутниковых систем, которые могут оказаться полезными для совершенствования передач частотно-временной информации в эксплуатационном режиме, будут часто встречаться ссылки на односторонний и двусторонний методы передач. В данном Отчете односторонний режим работы означает, что пользователь применяет только приемную аппаратуру для приема сигналов, либо передаваемых, либо ретранслируемых спутником. Односторонние передачи обычно ведутся в режиме вещания с целью обслуживания большого числа пользователей. Эти передачи обеспечивают широкую зону обслуживания, высокую точность синхронизации, простые методы и аппаратуру для приема сигналов времени и не слишком большие затраты для пользователей. Двусторонний режим работы подразумевает, что пользователи применяют как приемную, так и передающую аппаратуру, обычно в режиме связи от пункта к пункту. При двустороннем режиме передачи в общем достигается более высокая точность за счет относительной независимости от трассы распространения, связывающей пункты пользователей.

Различные варианты спутниковых систем или методов разделены для удобства на 3 отдельных группы:

- спутники, предназначенные главным образом для передачи шкал времени с высокой точностью;
- спутники, которые представляются наиболее подходящими для обычной передачи частотно-временной информации большому числу пользователей;
- системы/методы, которые обладают потенциальными возможностями как для совершенствования распространения, так и повышение точности передач частотно-временной информации.

Для каждого варианта спутниковой системы или метода вначале дается некоторая общая информация, представляющая собой описание системы или метода и их состояния в настоящее время. Эта информация сопровождается краткими выводами, содержащимися в таблице I; здесь дается сравнительная информация о каждой системе или методе, включая зону охвата, точность, некоторые оценки затрат пользователей, оценку возможностей использования на месте и указание на экспериментальный или действующий характер варианта спутниковой системы. В таблице II суммируются некоторые основные преимущества и недостатки каждого из рассмотренных вариантов спутниковых систем или методов. Для каждого варианта также дается краткая информация об опыте, накопленном в процессе экспериментов и/или в условиях эксплуатации, и рассматриваются перспективы на будущее.

ТАБЛИЦА I — Выборочная сравнительная информация для различных вариантов спутниковых систем или методов

Вариант спутниковой системы или метода	Охват	Потенциальная точность	Оценки затрат пользователя (в долларах США на 1987 год)	Возможности приема в пункте	Спутниковая система — действующая или экспериментальная
1. Спутники связи	Региональный или глобальный (сети)	< 10 нс	\$ 15 000 (VSAT) + \$ 15 000 (модем MITREX)	Зависит от конкретной спутниковой системы и местоположения	Действующая
2. GPS: Нормальный режим	Глобальный; непрерывный	Возможно, ≈ 100 нс, если нет ухудшений режима	Существующий синхронизирующий приемник: > \$ 15 000. Стоимость должна снизиться по мере совершенствования	Да	Сейчас на орбите 6 спутников. Полное развертывание после 1990 г.
Режим одновременного наблюдения	Межконтинентальный	Зависит от геометрических особенностей линии. Возможно, ≈ 10 нс по времени и 10^{-14} по частоте, если нет ухудшений режима	> \$ 15 000	Да	См. выше
3. LASSO	Европа, Африка. Зависит от местоположения спутника	Запланировано < 1 нс	Очень дорого: лазерная станция в полном комплекте $\approx$ \$ 1 млн. Обычно требуются дополнительные линии синхронизации для лазерных станций	В общем нет. Требуется лазерной станции	MID 1988 (METEOSAT-P2). Могут быть разработаны дополнительные блоки для повышения точности синхронизации до 100 пс
4. Эксперимент на космическом корабле многоразового использования	Зависит от специфики полета. Возможность охвата $\pm 57^\circ$ по широте	Запланировано < 1 нс (время) и 1×10^{-14} (частота)	Требуется двусторонних линий для использования 3-частотного метода. Дорого	Возможно с последующей доработкой аппаратуры для применения в эксплуатационном режиме	Эксперимент NAVEX во время полета космической лаборатории D1, ноябрь 1985 года: планов по действующей системе нет
5. Использование новых частот, распределенных в диапазоне 13—31 ГГц	Зависит от используемой спутниковой системы	Разрешение: < 1 нс. Точность: ограничена неопределенностями задержек, 6 нс	Дорого, пока не будет проведена доработка	Вероятно	В настоящее время планов по использованию в эксплуатационном или экспериментальном режиме нет
6. Одновременный прием сигналов измерения дальности	Региональный	10 нс	< \$ 30 000	Да	Использование спутника GMS в эксплуатационном режиме

ТАБЛИЦА I (продолжение)

Вариант спутниковой системы или метода	Охват	Потенциальная точность	Оценки затрат пользователя (в долларах США на 1987 год)	Возможности приема в пункте	Спутниковая система — действующая или экспериментальная
7. Метеорологические спутники	Зависит от системы. Полусферический для кода времени GOES США. Возможно распространение на Европу и Японию	± 16 мс (без коррекции) ± 1 мс (с коррекцией по средней задержке распространения) ± 100 мкс (полная коррекция)	\$ 3500 (точность 1 мс) \$ 4500 (точность 100 мкс) (включая антенны)	Да	GOES — действующая спутниковая система. Код времени на спутниках США с 1974 г.
8. Использование распределенной частоты 400,1 МГц	Зависит от используемой спутниковой системы	Базисный уровень: ≈ 1 мс С помощью PRN кода, вероятно, можно достичь < 1 мкс	Базисный уровень: $< \$ 500$ PRN код: $< \$ 3000$	Да	Имеется распределенная частота, но неизвестны планы по использованию
9. ОВЧ приемопередатчик или специализированный канал 10 кГц спутника связи	Региональный	Возможно, ≈ 1 мкс. Также можно передавать менее точные коды или речевую информацию	Стоимость должна быть довольно низкой	Да	Индия запланировала использование канала 10 кГц спутника INSAT примерно в 1984 г.
10. TRANSIT Действующая система	Глобальный, включая высокие широты, с периодическим прерыванием	≈ 30 мкс (один спутник) ≈ 10 мкс (несколько спутников)	$\approx \$ 12\,000$ для полностью автоматизированного приемника, со всенаправленной антенной	Да	Действующая
Усовершенствованный TRANSIT (NOVA)	Так же, как и выше, за исключением того, что в данный момент на орбите только 2 спутника	< 100 нс	от \$15 000 до \$ 50 000 после предварительной модернизации приемника	Да	Экспериментальная
11. Телевизионный вещательный спутник: Высокоточный режим работы	Региональный (OTS-2) или глобальный	Зависит от качества данных эфемерид. 300 нс и, возможно, < 50 нс	В настоящий момент: $\approx \$ 3300$. Стоимость должна быть значительно снижена при промышленном выпуске в достаточном количестве	Да. Могут использоваться антенны диаметром 1 м	В настоящий момент экспериментальная, но планируется большое число действующих спутников
Режим распространения общего пользования	См. выше	Зависит от возможности коррекции пути. Возможный код времени для общего пользования	Так же, как и выше. Меньшая потребность у пользователей в коррекции задержек при распространении	Да	См. выше

ТАБЛИЦА II — Основные преимущества и недостатки вариантов спутниковых систем или методов

Вариант спутниковой системы или метода	Основные преимущества	Основные недостатки
1. Спутники связи	В настоящее время имеются технологии и действующие системы. Накоплен значительный опыт. Обеспечена долговременная непрерывность работы. Двусторонний метод обеспечивает высокую точность. Стоимость и требуемый размер антенны уменьшаются. Высокая надежность регионального и международного охвата. В ряде случаев возможен прием в пункте. Может использоваться большая ширина полосы частот. Многие правительства уже имеют прямое отношение к работе этих систем	Текущие цены, хотя и снижаются, остаются относительно высокими. В некоторых случаях необходимы большие антенны, особенно для линий INTELSAT. Пользователь должен обладать возможностью передачи. В некоторых случаях необходимы дополнительные линии к спутниковому оборудованию из лабораторий времени и частоты. Для получения наивысшей точности требуется сложная калибровка задержек в наземной станции
2. GPS: Нормальный режим	Возможна высокая точность. Всемирный непрерывный охват. Достаточная избыточность системы и системное обеспечение. Метод одностороннего приема. Долговременная непрерывность работы. Вероятны значительные усилия, направленные на доработку приемника, если соответствующим образом не будут ограничены точность и доступ. Возможно использование небольших антенн. Прием в пункте	Точность синхронизации для гражданских пользователей может быть снижена до 250 нс (2 σ). Стоимость существующего приемника > \$ 15 000. Сложный формат сигнала. Односторонний метод требует определения пользователем задержки при распространении
Режим одновременного наблюдения	Потенциально более низкая стоимость приемников. Высокая точность синхронизации на расстоянии нескольких тысяч километров. Удобная работа в пункте. Погрешности эфемерид частично компенсируются. Требуется только знание дифференциальной задержки распространения.	Используется для региональных и межконтинентальных расстояний. Могут быть ограничения на доступ и точность для гражданских пользователей. Требуется некоторой координации и составления графиков работы между лабораториями, которые координируются MBMB
3. LASSO	Потенциально один из наиболее точных методов передачи времени. Может обеспечить погрешность < 1 нс. Время синхронизации составляет несколько минут. Стандартные блоки LASSO могут быть в будущем использованы на других спутниках	Большие затраты со стороны пользователя на приобретение оборудования. Большинство лазерных станций расположены на значительном расстоянии от лабораторий времени и частоты. Работа лазеров зависит от погодных условий. Нет планов по действующим системам. Отсутствует опыт по использованию лазерной техники.
4. Эксперимент на космическом корабле многократного использования	Потенциально один из наиболее точных методов для глобальной передачи времени. Использование двустороннего метода устраняет неопределенности по местоположению и скорости корабля. Использование нескольких частот снижает частотные погрешности. Нет зависимости от погоды. Позволяет прямые частотные сличения	Планов по работе в эксплуатационном режиме нет. Требуется сложное и дорогостоящее оборудование. Применение кораблей многократного использования для эксперимента ограничивает время наблюдения в течение каждого прохода
5. Использование новых частот, распределенных в диапазоне 13—31 ГГц	Частоты распределены на международном уровне для проведения частотно-временных измерений. Большая ширина полосы частот может обеспечить точность измерений < 100 пс. Использование не ограничено какой-либо конкретной спутниковой системой	Аппаратура в этом диапазоне частот требует дальнейшего совершенствования и снижения стоимости. Частоты распределены на основе совместного использования, т. е. вторичной основе. Вероятно, их использование не будет возможным в течение 5—10 лет

ТАБЛИЦА II (продолжение)

Вариант спутниковой системы или метода	Основные преимущества	Основные недостатки
6. Одновременный прием сигналов измерения дальности дальности	Несколько соответствующих спутников являются действующими. Возможность получения высокой точности. Возможность использования для глобальной координации. В пункте приема может использоваться относительно недорогое оборудование. Одновременно с передачей времени передается точная эфемеридная информация. Удобный метод одностороннего приема	Должен быть обеспечен доступ к спутниковой эфемеридной информации. Необходимы специальные контрольные пункты, объединяющие региональные системы для передачи времени в глобальном масштабе
7. Метеорологические спутники	Небольшие затраты пользователя. Уже используются некоторые серийные приемники. Возможно непрерывное обслуживание с использованием геостационарных спутников. Код времени уже применяется на спутниках GOES. Код времени GOES содержит полную информацию о дате и времени, соотношенном с UTC. Относительно надежная непрерывность работы в течение жизненного цикла спутника. Прием сигналов в пункте	Зона приема сигналов кода времени GOES в настоящее время ограничивается Западным полушарием. При приеме сигналов времени GOES возможны случайные погрешности времени > 100 мкс. Используемая частота 468 МГц распределена не только для частотно-временных применений. Распределение на вторичной основе может привести к помехам от сухопутной подвижной службы в некоторых районах. Должно быть налажено сотрудничество с организациями, не связанными с передачами времени и частоты
8. Использование распределенной частоты 400,1 МГц	Частота распределена на международном уровне для частотно-временных применений на <i>первичной</i> основе (с незначительными исключениями в некоторых районах). Совместимость с очень недорогим оборудованием пользователя. Применимая ширина полос частот дает возможность для обслуживания с двумя уровнями точности. Совместимость с имеющимися спутниковыми приемопередатчиками. Приемопередатчик на 400,1 МГц может быть использован как добавочный блок к некоторым спутникам. Эксплуатационные расходы этой службы могут быть гораздо ниже, чем расходы существующих ВЧ служб. Может быть смягчена острота проблемы ВЧ помех. Возможность выбора формы сигнала. Может легко обеспечиваться глобальный или по крайней мере международный охват с возможностью использования различных языков. Прием сигналов в пункте	Планы, касающиеся введения в действие, в настоящее время неизвестны. Необходима идентификация соответствующих спутников и разработка совместных мероприятий. Возможны трудности в том, чтобы убедить большое число пользователей в необходимости перейти к пользованию спутниковой службой, даже если в техническом отношении она превосходит другие службы. При замене ВЧ служб необходим длительный переходный период совместной работы обеих служб, чтобы произвести амортизацию оборудования и обучить пользователя
9. ОВЧ приемопередатчик или специализированный канал 10 кГц спутника связи	ОВЧ приемопередатчики используются главным образом во время выведения спутника на орбиту, а позднее могут быть применены для частотно-временных применений. Удобный диапазон. Долговременная непрерывность работы в течение жизненного цикла спутника. Стоимость аппаратуры может быть низкой. Канал 10 кГц позволяет передавать полную информацию о времени. Индия может реализовать в эксплуатационном режиме через INSAT. Работа на месте, в пункте	Не определена пригодность имеющихся приемопередатчиков. Требуются соглашения и активное сотрудничество с организациями, не связанными с передачей времени и частоты. Может оказаться, что выделенные каналы в основном недоступны для организаций, связанных с передачей времени и частоты, за исключением особых случаев. Ограниченная точность при использовании канала 10 кГц

ТАБЛИЦА II (продолжение)

Вариант спутниковой системы или метода	Основные преимущества	Основные недостатки
10. TRANSIT Действующая система	Система полностью действующая, надежно обеспечиваемая 5 спутниками. Глобальный охват. Возможно применение серийных приемников. Сигналы времени соотнесены с UTC. Прием в пункте. Для повышения точности автоматизированные приемники могут усреднять время проходов и выделять особые спутники. Вероятна долговременная работа спутника TRANSIT.	Прием синхронизирующих сигналов от спутников на полярных орбитах в данном пункте возможен только периодически. Временная информация имеет 30-минутную неопределенность. В приемнике должны быть учтены доплеровские сдвиги.
Усовершенствованный спутник TRANSIT (NOVA)	Возможна высокая точность при использовании метода одностороннего приема. Глобальный охват, включающий регионы высоких широт. Простые антенны; прием в пункте. Должны обеспечиваться улучшенные характеристики при использовании существующих приемников. На орбите находятся два спутника NOVA.	Усовершенствования NOVA для передачи времени все еще имеют только экспериментальный статус. Периодическая возможность приема сигналов времени. Может быть ограничена доступность большей части точной эфемеридной информации для обычных пользователей.
11. Телевизионный вещательный спутник: Высокоточный режим работы	Уже разработаны некоторые виды оборудования пользователя для телевизионных временных измерений. Во всем мире запланировано использование большого числа телевизионных спутников. Оборудование пользователя может быть довольно простым, возможно использование небольших антенн. Точность может быть очень высокой, если за счет дополнительных измерений в определенных выбранных пунктах определено местоположение спутника. Возможно получение низкого отношения сигнал/шум и использование широкой полосы. Прием в пункте. Обеспечивается долговременная непрерывность работы в течение жизненного цикла спутника.	Требуются дополнительные средства и методы для определения местоположения спутника и передачи этих данных пользователям для корректировки пути распространения. Зона охвата в основном ограничена регионами или в некоторых случаях отдельными странами.
Режим распространения общего пользования	Разработана аппаратура для использования телевизионных синхросигналов. Код времени может быть добавлен к передаче кадра. Возможно использование небольших антенн, простых приемников и простой измерительной техники. Вероятно большое число действующих долговременных телевизионных спутниковых систем. Прием в пункте. Возможно получение низкого отношения сигнал/шум и использование широкой полосы.	Необходима информация о задержках на трассе распространения. Охват в основном региональный или по отдельным странам. Требуется сотрудничество с организациями, не связанными с передачами времени и частоты, для добавления кода времени к передаче кадра.

4.1 Типы спутников, в основном используемых для высокоточной передачи времени и частоты

4.1.1 Спутники связи

Доступность и использование каналов связи, которые обеспечиваются действующими спутниковыми системами связи, находящимися в ведении многих компаний, стран и региональных групп стран, растут быстрыми темпами. Для проведения высокоточных сличений времени между двумя пунктами можно, например, организовать одновременный обмен соответствующими сигналами времени через спутниковую линию связи. В каждом пункте проводятся измерения временной разности между передаваемыми и принимаемыми временными метками. Если предположить, что задержки сигнала при прохождении через среду распространения, спутниковый приемопередатчик и приемно-передающую аппаратуру симметричны, то разность времени между двумя пунктами можно считать просто на основе измеренной в каждом пункте временной разности без знания местоположения спутника и пользователя. Обычно такие измерения проводятся в течение 10—60 мин один или два раза в неделю. Возможны и другие модификации данного метода, не требующие одновременного обмена сигналами. Имеющиеся в настоящее время спутники связи работают в распределенных полосах частот 4/6 или 11/12/14 ГГц. Пользователь обладает достаточной свободой в выборе формы сигнала, а в некоторых случаях и ширины полосы канала. При использовании некоторых систем необходимо арендовать всю ширину канала приемопередатчика в 36 МГц; в других системах каждый канал можно подразделить. В цифровых системах часто присутствует как «стандарт» канал для передачи данных со скоростью 56 кбит/с, однако нередко используются скорости передачи 1,5 Мбит/с и выше.

В некоторых случаях (например, в США) международные линии сличения через спутники связи могут быть организованы на двухэтапной основе: одна линия от лаборатории времени до международной спутниковой оконечной станции сопряжения через национальный спутник, а другая — от международной спутниковой оконечной станции сопряжения до какой-либо другой страны через международный спутниковый канал связи.

Первый опыт по использованию спутников связи для высокоточной передачи времени был получен в 1962 году, когда было проведено сличение часов Военно-морской обсерватории США (USNO), Национальной физической лаборатории Соединенного Королевства (NPL) и Королевской гринвичской обсерватории Соединенного Королевства (RGO) с точностью 1 мкс методом двустороннего обмена импульсами 5 мкс при частоте повторения 10 Гц. При этом использовался экспериментальный спутник связи TELSTAR [Steele и др.]. Почти через 3 года для аналогичных передач шкал времени между USNO и Исследовательской лабораторией по радио (RRL) в Японии использовался спутник Relay; была достигнута установленная точность 0,1 мкс. [Markowitz и др., 1966]. Во время этих первых экспериментов линии вверх и вниз работали в диапазоне частот 1,7—6,4 ГГц.

В период 1974—1975 годов несколько различных организаций использовали экспериментальный спутник связи США ATS-1 для проведения опытных двусторонних передач времени с использованием более сложных сигналов в виде псевдослучайных шумовых (PRN) кодов. Корреляционное детектирование сигналов с PRN кодом дало очень высокую точность и разрешение при передачах шкал времени. В первой серии экспериментов, целью которых являлась синхронизация ведущей станцией в западной части США ведомой станции в восточной части США, НАСА (США) получило точность на уровне 50 нс и разрешающую способность измерений лучше 1 нс. [Chi и Yutop, 1975]. В том же 1975 году были осуществлены аналогичные передачи шкал времени на межконтинентальные расстояния между RRL (Япония) и USNO и НАСА (США) с использованием сложной системы связи с произвольным доступом и расширенным спектром; точность после введения релятивистских поправок составила около 10 нс [Saburi и др., 1976]. Все эксперименты со спутником ATS-1 проводились в полосе частот 4/6 ГГц. Начиная с 1970 года аналогичные передачи шкал времени с точностью 100 нс осуществляются в эксплуатационном режиме между более чем 20 станциями с использованием спутников системы связи министерства обороны США. В этих передачах используются сигналы PRN кода малого уровня, которые не причиняют помех работе обычной связи [Easton и др., 1976].

Другая серия двусторонних передач шкал времени была проведена с 1976 по 1982 год в полосе частот 4/6 ГГц с использованием европейских экспериментальных спутников типа «Симфония». Было сообщено об успешной двусторонней передаче шкал времени с точностью около 50 нс и выше и с разрешающей способностью в несколько наносекунд между Райстингом (ФРГ) и Племер-Буду (Франция) [Brunet, 1979]; между NRC (Канада), LPTF (Франция) и Племер-Буду (Франция) [Costain и др., 1979]; между NRC (Канада) и РТВ (ФРГ) через Райстинг; между Шанхаем, Пекином и Нанджином (КНР); между NIM (Государственным институтом метрологии) (КНР) и РТВ (ФРГ) [Cuiying, 1981]; между Шанхайской и Шаньсийской обсерваториями (КНР) и LPTF (Франция); между NPL (Индия) и РТВ (ФРГ) [Mathur и др., 1980].

При проведении сличений между NRC (Канада) и LPTF (Франция) регулярные передачи времени продолжались в течение 4 лет с июня 1978 года по июль 1982 года. В феврале 1980 года в этих регулярных сличениях через спутник «Симфония» стал принимать участие РТВ. Эти трансатлантические линии передачи времени использовались МБВ вместо линий Лоран-С. В большинстве из передач времени использовались относительно простые форматы сигналов, представляющие собой сигналы 1 импульс/с. Основной вклад в общую погрешность передач шкал времени обычно вносили трудности определения точных задержек сигнала при прохождении через наземное спутниковое оконечное оборудование, а также погрешности, связанные с необходимостью установления линий передачи времени между спутниковым приемным оборудованием и лабораториями времени. Введение нового метода модуляции 1 МГц (модемы, разработанные в NRC) уменьшило случайную погрешность, связанную со спутниковой линией, до нескольких десятых долей наносекунды. Участие РТВ в сличениях позволило проводить каждый раз три отдельных сеанса измерений и оценивать результирующую ошибку «шлейфа» Δ как измеренную неопределенность. При использовании модуляции только 1 Гц получали $\Delta = -42 \pm 8$ нс, в то время как система 1 МГц обеспечивала $\Delta = -8 \pm 6$ нс.

Совместный американско-канадский спутник CTS/Гермес предоставил возможность лабораториям USNO и NBC в США и NRC в Канаде в течение 1978—1979 годов проводить эксперимент с использованием некоторых модификаций двустороннего метода передач, который использовался ранее [Costain и др., 1979]. Во-первых, в линиях связи вверх и вниз с большой эффективностью использовались более высокие частоты в полосе 12/14 ГГц. Во-вторых, как и при вышеуказанном методе, в какой-то части эксперимента помимо обычных сигналов 1 импульс/с использовались сигналы 1 МГц. Это позволило получить более высокое разрешение порядка 0,2 нс (1σ) и провести точные сличения времени всего лишь за несколько минут или даже секунд фактического времени измерения. В-третьих, часть времени на 2 из 3 пунктов можно было использовать небольшие, предназначенные для работы на месте приемные терминалы с антеннами диаметром 2,4 м. Шкалы времени UTC сличались с погрешностью порядка 1×10^{-14} . В-четвертых, иногда имелась возможность проводить сличения между NBS (США) и Племер-Буду (Франция) в два этапа: сначала путем установления линии между NBS и NRC с использованием спутника CTS/Гермес, а затем между NRC и Францией через спутник «Симфония». Разрешающая способность измерений при этом двухэтапном методе составила менее 10 нс (1σ).

Национальный электротехнический институт (IEN) в Италии использовал экспериментальный спутник связи Sirio-1 в диапазоне 12/17 ГГц для оценки еще одной модификации двустороннего метода передачи времени [Detoma и Leschiutta, 1980]. При этом за движением спутника велось непрерывное наблюдение, так что между двумя станциями необходимо было использовать лишь одну линию связи в режиме временного разделения. Влияние движения спутника на точность передачи времени оценивалось только в несколько наносекунд за время измерения до 20 с. Разрешающая способность измерений составила от 1 до 5 нс.

В NRC в Оттаве проводились эксперименты по двусторонней передаче времени через коммерческие геостационарные спутники 6/4 ГГц с использованием пар CW сигналов малой мощности. Две экспериментальные наземные спутниковые станции мощностью 1 Вт с антеннами диаметром 3 м были установлены на уровне земли в 100 м от лаборатории времени; прямая связь с лабораторией осуществлялась с помощью триаксиального кабеля [Costain и др., 1982].

В 1983 году сигналы $f_0 \pm 0,5$ МГц передавались через спутники Anik-A3, а частота 1 МГц восстанавливалась напрямую [Costain и др., 1983]. Среднеквадратическая девиация измерений составила 0,4 нс. Эти эксперименты показали, что передача шкал времени с использованием CW сигналов или PRN кода реальна с применением недорогих терминалов.

Один из терминалов NRC, работающий в диапазоне 6/4 ГГц, с антенной диаметром 3 м был переоборудован для работы в диапазоне 14/12 ГГц; был также приобретен модем PRN кода, рекомендованный Временной рабочей группой 7/4. Была реализована экспериментальная сеть с использованием геостационарного спутника 14/12 ГГц для двусторонней передачи шкал времени между NRC, USNO и NBC. Это обеспечило качественную проверку метода передачи времени через систему GPS, действующую в настоящее время.

В Японии в Исследовательской лаборатории по радио (RRL), которая в настоящее время называется CRL (Научно-исследовательская лаборатория связи), разрабатывается национальная система точных сличений шкал времени, в которой используются японский геостационарный спутник связи CS (спутник связи средней мощности для экспериментальных целей), аппаратура с произвольным доступом и расширенным спектром (SSRA) и земные станции, работающие в диапазоне 30/20 ГГц, такие как ведущая станция в Касиме и 2 небольшие подвижные станции. В 1981 и 1982 годах проводились эксперименты по двусторонней передаче шкал времени между ведущей станцией и небольшой станцией, расположенной в главном управлении, а также между двумя небольшими станциями, находящимися в одном и том же месте. В каждом случае были получены флуктуации времени порядка 1 нс и нестабильность частоты менее чем 1×10^{-13} за время усреднения 100—200 мин. Точность экспериментов, по оценкам, составила 13 нс для сличений шкал времени между ведущей станцией и станцией, расположенной в главном управлении, с использованием в качестве эталона двусторонней передачи времени через наземную СВЧ линию; в эксперименте по двусторонней передаче времени между двумя небольшими станциями, находящимися в одном месте с общими часами, была получена точность на уровне 0,74 нс. Временная задержка на каждой станции определялась

путем введения импульсно-модулированного сигнала в каждый канал передачи линий вверх и вниз на станции с его последующим детектированием на другом конце канала для сравнения с импульсом на входе. Для ведущей станции задержка, по оценкам, составила 7,7 нс, а для небольших станций — 3,6 нс [Imae и др., 1983] (см. таблицу III).

ТАБЛИЦА III — Результаты измерений задержек на двух небольших станциях

	Временная задержка (нс)
Диаметр антенны 1 м, задержка в линии вверх (U_1)	329,6
Диаметр антенны 1 м, задержка в линии вниз (D_1)	372,0
Диаметр антенны 2 м, задержка в линии вверх (U_2)	361,3
Диаметр антенны 2 м, задержка в линии вниз (D_2)	401
$K = (U_1 - D_1) - (U_2 - D_2)$ (K_1)	-2,7
Значение K при использовании метода общих часов (K_2)	-6,3
$K_1 - K_2$	3,6

В Государственном институте метрологии Китайской Народной Республики (NIM) также проводились эксперименты по сличению шкал времени через спутник связи с помощью аппаратуры SSRA (аппаратура с произвольным доступом и расширенным спектром). Результаты экспериментов, проведенных между пекинской земной станцией и земной станцией Wulumuqi через спутник STW-1, свидетельствуют о том, что использование метода SSRA при работе в двустороннем режиме дает разрешение около 1 нс и погрешность порядка 10 нс [Cuiying Xiao, 1987].

Летом 1983 года USNO, COMSAT, Технический университет в Берлине и DFVLR (ФРГ) провели совместные эксперименты по передаче шкал времени на межконтинентальные расстояния между станциями в Вашингтоне (США) и Оберпфaffenхофене (ФРГ) с использованием спутника INTELSAT-V. На земной станции сигнал времени вводился в линию связи через модем MITREX в виде псевдослучайной шумовой (PRN) последовательности со скоростью передачи элементов последовательности 2 МГц на интерфейсе промежуточной частоты и ретранслировался на приемном конце. Точность передачи времени измерялась путем корреляционного детектирования первоначальной PRN последовательности с ее принятой копией. На земных станциях при значениях G/T, равных 20 дБ (K^{-1}) и 26 дБ (K^{-1}) (что соответствует диаметру антенн в 2,2 м и 4,5 м), и мощности передатчиков 170 и 80 мВт, соответственно, были проведены эксперименты по надежной передаче шкал времени, в результате которых получен среднеквадратический разброс по времени менее 1 нс. При выбранных характеристиках линии сигнал времени, распределенный по полосе шириной 2 МГц, был принят при отношении сигнал/шум, равном -9 дБ, что гораздо ниже уровня теплового шума [Hartl и др., 1983 г.].

В Европе эксперимент по передаче времени был проведен между FTZ (ФРГ) и TUG (Австрия) через спутник ECS-1 с использованием модемов MITREX. Похожие результаты были получены при совместном использовании приемопередатчика спутника и телевизионного сигнала [Kirchner и др., 1986 г.; Kirchner и др. ...].

Кроме того, в TUG был проведен большой цикл измерений на самом модеме MITREX. При отношении несущая/шум-плотность мощности выше 58 дБГц обеспечивалось типовое разрешение менее 0,5 нс; нижний предел около 0,1 нс. Время, необходимое для накопления сигналов, составляет менее 20 с. Вариации задержек сигнала составили менее 0,5 нс для широкого диапазона параметров работы (различные коды, установка встроенного аттенюатора, мощность входного сигнала). Важнейшим параметром является частота на входе, которая должна поддерживаться в пределах ± 3 кГц от номинальной величины, с тем чтобы вариации задержек сигнала составляли менее 0,5 нс [Kirchner, 1986].

В Северной Америке прилагаются усилия к тому, чтобы создать действующую сеть сличений шкал времени между Национальным институтом стандартов и технологии США (NIST) (бывшее Национальное бюро стандартов), Военно-морской обсерваторией США (USNO) и Национальным исследовательским советом (NRC) Канады. Особое значение придается использованию сравнительно небольших, доступных, тщательно откалиброванных наземных станций, оснащенных модемами MITREX с расширенным спектром, для обеспечения регулярного двустороннего обмена сигналами времени по имеющимся коммерческим спутниковым каналам связи в полосе частот 11–12 ГГц. Последние результаты, полученные в NIST, показывают, что при проведении таких сличений вполне реально использовать терминалы с очень небольшой апертурой (обычно называемые VSAT), соответствующей диаметру параболической антенны 1,8 м. Измеренная величина нестабильности $\sigma_y(\tau)$ аппаратуры VSAT в NIST составила $4 \times 10^{-10} \tau^{-1}$ при отношении несущая/шум-плотность мощности 65 дБГц; эту величину можно улучшить до 3×10^{-15} за время усреднения в несколько дней. Дифференциальные задержки наземной станции, которые играют решающую роль в результирующей точности сличений шкал времени, можно эффективно откалибровать на уровне 1 нс, используя разработанный в Японии метод, который заключается в обмене сигналами между двумя находящимися в одном месте наземными станциями; сигналы генерируются общим эталоном времени [Imae и др., 1983]. Чтобы помочь в проведении калибровок аппаратуры, была приобретена небольшая подвижная земная станция, которую можно перемещать между различными лабораториями в действующей сети.

Начиная с августа 1987 года Национальный институт стандартов и технологии США (NIST) (бывшее Национальное бюро стандартов) и Военно-морская обсерватория США проводят регулярные (3 раза в неделю) сличения шкал времени через коммерческие спутниковые каналы связи с использованием двустороннего метода. В течение трехмесячного периода эти данные демонстрировали обычную ежесуточную точность измерений менее 500 пс при использовании серии из 100 односекундных измерений за каждые сутки. Остаточная разность линейной регрессии за трехмесячный период составила величину в пределах 10 нс [Klepczynski, 1988].

4.1.2 Система GPS (глобальная система определения местоположения)

Система GPS (известная также как NAVSTAR) реализуется министерством обороны США в качестве высокоточной системы навигации/определения местоположения, доступной в любое время [Milliken и Zoller, 1978]. Планируется, что система будет включать 24 (21 основной и 3 резервных на орбите) действующих спутника на 6 орбитальных плоскостях. В результате того, что на орбите будет находиться 24 спутника с периодом обращения 12 часов, несколько из них всегда можно будет наблюдать из любого конкретного пункта в любое время. На борту каждого спутника находятся атомные часы (проводились исследования на цезиевых, рубидиевых и водородных стандартах), которые генерируют сигналы времени с очень хорошими характеристиками как часть формата навигационного сообщения. Эта система поддерживается широкой сетью контрольных станций и станций управления, которые предоставляют уточненные поправки для бортовых атомных часов. Хотя время в системе GPS обязательно будет точно совпадать со шкалой UTC, его положение относительно UTC всегда будет точно известно. Сложный формат сигнала GPS передается пользователям на частотах 1575 и 1228 МГц и может быть принят с помощью небольших всенаправленных антенн. Кодированная информация содержит поправки к показаниям часов, поправки на ионосферные эффекты, данные по эфемеридам спутника для расчета односторонней задержки при распространении. Сигнал GPS формируется таким образом, чтобы его навигационные возможности и возможности для передачи времени могли быть реализованы на 2 различных уровнях точности.

В 1985 году министерство обороны США объявило, что гражданские лица смогут по-прежнему пользоваться кодом C/A системы GPS, который включает в себя информацию о времени и положении спутника, и плата за пользование взиматься не будет. Более того, было заявлено, что неопределенности (2σ) по времени и по положению для гражданских пользователей составят не более 250 нс (относительно времени в системе GPS), 100 м (горизонтальное положение) и 156 м (вертикальное положение).

Планируется создать гражданскую службу GPS, которая будет координировать предоставление информации, необходимой гражданским пользователям, такой как данные, эфемериды, рекомендации и временная информация. Эта служба должна выступать в качестве связующего звена между военно-воздушными силами (BBC) США и гражданским сообществом.

В настоящее время (по состоянию на сентябрь 1989 года) на орбите находится 6 действующих спутников GPS, которые можно использовать для передач шкал времени с высокой точностью. На борту трех спутников находятся рубидиевые стандарты, а на борту трех других — цезиевые стандарты. Вся система (24 спутника), по плану, должна быть развернута к 1991 году. Сейчас разрабатываются различные типы GPS приемников навигационной и временной информации, предназначенных для различных областей применения.

Существуют несколько различных методов использования сигналов времени системы GPS для проведения сличений и передач шкал времени с высокой точностью. В нормальном режиме передаваемые сигналы принимают в пункте пользователя, декодируют, корректируют с учетом ошибок часов GPS, ионосферных эффектов и спутниковых эфемерид, используя кодированную информацию, содержащуюся в этих сигналах, а затем сравнивают с выходными сигналами местных часов. На реализуемую точность очень большое влияние будет оказывать конкретная информация о поправках, предоставленная пользователям.

В режиме одновременного наблюдения один и тот же сигнал GPS принимают одновременно в двух (или более) пунктах [Allan и Weiss, 1980]. Поскольку все ошибки часов и некоторые ошибки в эфемеридах, а также неопределенности поправок на трассу распространения являются общими для наблюдений в каждом пункте, оценивается степень компенсации таких ошибок, и можно получить сравнительно высокую точность синхронизации. Большое количество сличений шкал времени и частоты, проведенных с помощью системы GPS многими различными лабораториями в глобальном масштабе, показало, что, по существу, в условиях эксплуатации можно получить погрешность сличений по времени менее 10 нс и погрешность сличений по частоте менее 1×10^{-14} [Allan и др., 1985]. Для достижения такого уровня точности сличений по частоте достаточно время усреднения порядка 1 недели. На расстоянии 500 км погрешность можно уменьшить на 1 или 2 нс при условии, что известны дифференциальные геодезические координаты с погрешностью до нескольких «ближних» дециметров; однако было установлено, что эти координаты могут быть выведены из самих сличений шкал времени [Guinot и Lewandowski, 1987]. Благодаря чрезвычайно стабильному поведению часов на борту спутника GPS в течение многочасовых периодов наблюдения для передачи шкал времени на межконтинентальные расстояния может оказаться целесообразным использовать модификацию вышеуказанного метода, заключающуюся в последовательном наблюдении за одним и тем же спутником с задержкой между наблюдениями.

Для сличения часов необходимо знать разность задержки в приемнике. Ее можно измерить в каждой лаборатории путем перевозки приемника, выполняющего функции перевозимого эталона. Было выполнено несколько серий калибровок [Buisson и др., 1985; Lewandowski и др., 1986]. Такие калибровки проводились и в МБМВ.

Поскольку результаты сличений через систему GPS оказались в 10—100 раз лучше соответствующих данных, полученных с помощью системы Лоран-С, то в процессе формирования шкал ТАИ и UTC были выявлены и устранены определенные несоответствия и ошибки вплоть до 1 мкс. В некоторых случаях результаты, полученные через систему GPS, сравнивались с результатами, полученными с помощью перевозимых часов; они обычно согласовывались друг с другом в пределах суммарных погрешностей (несколько десятков наносекунд) используемого метода. Если говорить о первичных лабораторных цезиевых стандартах, таких, например, что имеются в NIST, NRC и PTB, метод одновременного наблюдения сигналов GPS позволяет сличать эти приборы с погрешностью менее 1×10^{-14} , вносимой самим процессом сличения. Описание ряда конкретных сличений шкал времени и первичных эталонов частоты с использованием системы GPS дано в работах, указанных в разделе «Ссылки» [Allan и др., 1985; USNO, 1985].

Международные службы времени и частоты все шире и шире используют систему GPS в режиме одновременного наблюдения. По состоянию на 1 января 1987 года, шкала Международного атомного времени (TAI) и шкала UTC формировались на базе 160 часов и 10 первичных стандартов частоты. 62% часов и 80% первичных стандартов частоты (по состоянию на эту дату) вносили свой вклад в формирование шкал TAI и UTC с помощью системы GPS в режиме одновременного наблюдения. МБМВ рассылает международный график слежения за спутниками всем, кто участвует в формировании шкал, с тем чтобы использовать преимущества метода одновременного наблюдения.

Ряд лабораторий сообщили о результатах, полученных в процессе использования системы GPS. Некоторые из этих результатов кратко изложены в конце данного раздела.

Военно-морская обсерватория США (USNO), используя серийный приемник GPS, с ноября 1979 года непрерывно контролирует передачи в системе GPS. С 10 октября 1980 года данные, полученные с помощью приемника GPS (MJD-44522), распространяются в машиночитаемой форме. Самые последние данные можно получить в реальном масштабе времени через автоматизированную службу данных USNO; кроме того, они публикуются в Сообщениях службы времени USNO, серия 4. С 1 декабря 1982 года шкала времени GPS поддерживается в пределах 1 мкс от шкалы UTC (USNO), а передаваемые поправки позволяют осуществлять синхронизацию по шкале UTC (USNO) в пределах 100 нс.

В Национальном бюро стандартов (США) разработан собственный вариант приемника сигналов времени GPS, главным образом предназначенный для использования в режиме одновременного наблюдения. Стабильность внутренней задержки в приемнике находится на уровне 1 нс, а наблюдаемая стабильность сигналов спутника обычно составляет 5 нс за время усреднения 15 с [Davis и др., 1981a].

Регулярные сличения шкал времени, проводившиеся USNO и NBS на протяжении многих месяцев с использованием таких приемников различной конструкции, показали, что через систему GPS можно передавать сигналы времени с погрешностью менее 100 нс [Putkovich, 1980; Davis и др., 1981b]. Серия сличений, которая проводилась в этих организациях в течение 14 суток, обеспечила сличение двух шкал времени UTC с погрешностью около 2×10^{-15} .

Межконтинентальные сличения частоты между космическим агентством ФРГ (DFVLR) и USNO (Вашингтон) с использованием экспериментального приемника дали погрешность порядка 2×10^{-14} за интервал измерения 12 суток [Starker и др., 1982].

С помощью экспериментального приемника сигналов времени GPS Военно-морской исследовательской лаборатории (NRL) оказалось возможным провести сличение водородных мазеров, находящихся в США и Франции [Wardrip и др., 1983]. Лаборатория реактивного движения в США использует систему GPS для координации времени и частоты трех водородных часов, расположенных приблизительно на одном и том же расстоянии друг от друга на поверхности Земли. Используя приемники сигналов времени GPS, можно определить, что при сличениях водородных часов в почти реальном масштабе времени отклонение по времени находится в пределах 50 нс, а отклонение по частоте — в пределах 1×10^{-15} [Clements и др., 1984].

В 1982 году система передачи времени GPS стала использоваться в Токийской астрономической обсерватории (TAO) [Fujimoto и др., 1983], где проводятся регулярные измерения при сотрудничестве в международном масштабе. Линия связи в режиме одновременного наблюдения через Тихий океан между TAO и USNO [Allan и Weiss, 1980; Klepczynski, 1982] была прокалибрована на основе трех экспериментов с перевозимыми часами; совпадение результатов при использовании обоих методов находилось в пределах экспериментальных ошибок [Aoki и др., 1984]. Погрешность передачи времени GPS по этой линии, по оценкам, составила 4×10^{-13} за время усреднения 1 сутки и 3×10^{-14} за время усреднения 10 суток.

Научно-исследовательская лаборатория связи (CRL) (бывшая Исследовательская лаборатория по радио (RRL)) в Японии с августа 1984 года проводит международные сличения шкал времени с помощью двух приемников GPS, один из которых был разработан в CRL, а другой — независимо от первого — японской электротехнической фирмой. Погрешность при сличении шкал времени с помощью этих приемников составляет 6—20 нс; задержки в приемнике были определены с погрешностью 15 нс с использованием имитатора сигналов GPS [Yoshimura и др., 1986; Imae и др., 1985].

С 12 по 18 июля 1987 года в Китае между двумя регионами — Пекином и Сианем — был проведен эксперимент по синхронизации шкал времени с использованием метода одновременного наблюдения сигналов GPS. В этом эксперименте принимали участие такие китайские организации как BIRMM, CSAO, CXIN и WAO. В тот же самый период между этими двумя регионами был проведен эксперимент с использованием цезиевых перевозимых часов. Для двух пунктов, находящихся на расстоянии 1000 км друг от друга, погрешность синхронизации шкал времени составила 10—17 нс [Yin-Bai Zhang и Zong-Yang Li, 1988].

В 1983 году Национальное бюро стандартов США (NBS) организовало новую службу по калибровке, основанную на методе «одновременного наблюдения» сигналов времени GPS. В каждом пункте пользователя NBS обеспечивает пользователя полностью автоматизированной, не требующей доработки или настройки приемной системой сигналов GPS, которая включает в себя приемник и контроллер системы, располагает возможностями для хранения данных и анализа, телефонным доступом, возможностью обучения персонала и системным обеспечением. Приемник, расположенный в пункте пользователя, автоматически передает свои данные на компьютер NBS, который хранит неопработанные данные, определяет, какие элементы данных пригодны для расчетов, связанных с передачей времени, и обеспечивает оптимально отфильтрованное значение для времени и частоты часов пользователя относительно атомных шкал времени NBS. Пользователю предоставляют возможность доступа к базе данных одного из компьютеров NBS, через который он может получать как неопработанные данные, так и результаты анализа NBS.

Эксперименты, проведенные с использованием этой службы, свидетельствуют о том, что вполне достижимы погрешность на уровне нескольких наносекунд и стабильность частоты порядка 1×10^{-14} или ниже. Кроме того, все первичные стандарты частоты, которые участвуют в формировании шкалы ТАИ с использованием метода одновременного наблюдения GPS, доступны в пункте калибровки, который может находиться в любой точке земного шара. Это оказалось чрезвычайно полезным, например, при определении стабильности частоты для векового отрицательного ускорения скорости вращения миллисекундного пульсара (PSR 1937 + 21) на уровне нескольких долей на 10^{14} [Rawley, 1987].

Все более широкому использованию метода одновременного наблюдения сигналов GPS способствуют некоторые разработки. Многие лаборатории регулярно предоставляют данные своих измерений через систему GPS широкому кругу пользователей, регистрируя результаты в информационной системе GE Mark 3. Такой обмен данными подкрепляется соглашением об использовании «стандартизированного» формата данных. Кроме того, чтобы помочь различным лабораториям определить, когда проводить измерения через систему GPS, совпадающие по времени с измерениями других выбранных лабораторий, NBS регулярно разрабатывает и рассылает графики работы, основанные на конкретных географических регионах. Число организаций, разрабатывающих GPS приемники сигналов времени, по-видимому, значительно возрастает. Некоторые лаборатории продолжают разрабатывать свои собственные варианты приемников, однако имеется также несколько различных серийных устройств.

4.1.3 Система GLONASS (глобальная навигационная спутниковая система)

Глобальная навигационная спутниковая система (GLONASS), внедряемая в СССР, имеет много общего с описанной выше системой GPS. В настоящее время это действующая система. К концу 1990 года предполагается развернуть 10—12 спутников, а полная система, реализация которой предусмотрена в 1991—1995 годах, будет состоять из 24 рабочих спутников, в том числе 3 резервных.

Информация о технических характеристиках и параметрах системы GLONASS дана в документе, представленном СССР на 4-м совещании Специального комитета по будущим аэронавигационным системам Международной организации гражданской авиации (ИКАО) [ICAO, 1988]. Различные аспекты системы GLONASS, включая конфигурацию орбиты и содержание и структуру сигналов, также изучались в Соединенном Королевстве профессором Дейли [1988] и Дейлом и др. [1989].

Хотя общие концепции систем GPS и GLONASS схожи, имеется ряд отличий, о которых стоит упомянуть. Созвездие спутников в системе GLONASS находится на более низкой высоте, чем в системе GPS (19,100 км), на почти круговой орбите с периодом обращения 11 ч 15 мин и углом наклона $64,8^\circ$. Следы спутников на поверхности Земли повторяются после интервала в 17 орбит, в то время как у системы GPS этот интервал составляет 2 орбиты. В отличие от системы GPS каждый спутник имеет литерную частоту в полосе частот выше 1600 МГц, определяемую отношением для j -го спутника:

$$f_j = f_1 + (j - 1) \Delta f, \text{ где } j = 1, 2, \dots, 24;$$

$$f_1 = 1\,602,5625 \text{ МГц}, \Delta f = 0,5625 \text{ МГц}.$$

Данные, передаваемые каждым спутником, как правило, каждые полчаса, содержат информацию об эфемериде в виде вектора положения и скорости. При расчете промежуточных положений орбиты через оскулирующий эллипс Кеплера получают точность на уровне 10—20 м. В потоке данных полностью отсутствует информация об ионосфере, и пользователь, которому необходимы поправки на задержку сигнала в ионосфере, должен получать их из других источников или, возможно, путем определения задержки P кода между частотами L1 и L2, причем последняя частота (L2) находится в диапазоне 1240—1260 МГц при разносе каналов 0,4375 МГц.

4.1.4 Система LASSO (лазерная синхронизация на геостационарной орбите)

В концепции, разработанной Международным бюро времени (МБВ) и представленной Европейскому космическому агентству (ЕКА) на обсуждение, предусматривается использование лазерного ретрорефлектора, установленного на соответствующем геостационарном спутнике, и оснащенных лазерными телескопами наземных станций, которые должны быть синхронизированы [Serene и Albertinoli, 1979; Serene, 1980]. Каждая наземная станция передает лазерные импульсы на спутник, детектирует отраженные импульсы и измеряет время двусторонней задержки. На спутнике полученные с наземных станций импульсы также детектируются; кроме того, измеряется время их прихода по шкале часов спутника, с тем чтобы определить разницу во времени их прихода. Эта измеренная на спутнике разница затем объединяется с временем двусторонних задержек, измеренным на каждой наземной станции, и с известной временной зависимостью между излучаемыми лазерными импульсами и местными часами. После этого информация о времени со спутника может быть направлена на наземные станции по обычным телеметрическим каналам, а наземные станции могут обмениваться своими данными по телетайпным или другим наземным каналам. Блок приборов LASSO был успешно запущен на орбиту на спутнике METEOSAT-P2 в июне 1988 года. Начальные данные поступают из одного пункта (CERGA, Грас, Франция) и в настоящее время анализируются. Предполагается, что в будущих экспериментах будут участвовать и другие пункты.

4.1.5 Проводимые в США эксперименты по передаче времени и частоты с применением космических кораблей многоразового использования

Цель этих экспериментов — продемонстрировать возможность передачи шкал времени с погрешностью 1 нс и проведения сличений частоты с погрешностью 1×10^{-14} в глобальном масштабе. Этот метод заключается в использовании высокоточных двусторонних СВЧ линий передачи сигналов времени и данных между космическим кораблем многоразового использования США («шаттл») и оснащенными соответствующей аппаратурой наземными станциями.

Во время первого полета немецкой космической лаборатории (D1) на борту американского космического корабля многоразового использования в ноябре 1985 года двое атомных часов (одни — цезиевые, а другие — рубидиевые) находились на орбите высотой 326 км с углом наклона 57° . Эти часы входили в программу совместного навигационного эксперимента NAVEX, в котором участвовали DFVLR, РТВ и другие организации [Starker и др., 1987].

На наземной контрольной станции DFVLR в Оберпфaffenхофене можно было наблюдать 6 прохождений космического корабля многоразового использования в день. Во время этих прохождений проводились сличения времени между бортовыми цезиевыми часами и двумя другими цезиевыми часами, находившимися на Земле.

Передача шкал времени осуществлялась по двусторонней СВЧ линии связи на частоте 1,53/1,43 ГГц с использованием сигналов псевдошумового кода, метода корреляционного приема и метода передачи данных с расширенным спектром.

После проверки основных технических и рабочих функций аппаратуры было проведено сличение бортовых и наземных шкал времени при сеансах измерений, продолжавшихся 74 часа. За это время было определено расхождение между бортовыми часами и наземными эталонными часами с погрешностью $\sigma_y \approx 0,16 \times 10^{-13}$. Показания часов при различных прохождении спутника продемонстрировали случайные флуктуации порядка $\sigma_x \approx 5,8$ нс. Релятивистский сдвиг частоты был определен путем сравнения результатов измерений, полученных в полете, с результатами измерений на Земле до и после полета немецкой космической лаборатории D1 [Starker и др., 1988]. Полученный результат $\Delta y = -(294,69 \pm 0,15) \times 10^{-12}$ согласуется с теоретической величиной в пределах 0,5%.

4.1.6 Использование полос частот в диапазоне 13—31 Гц, распределенных ВАКР-79

Всемирная административная радиоконференция, состоявшаяся в 1979 году (ВАКР-79), распределила следующие дополнительные полосы частот для передачи времени и частоты с использованием спутников:

- 13,4—14,0 ГГц (Земля—космос);
- 20,2—21,2 ГГц (космос—Земля);
- 25,25—27,0 ГГц (Земля—космос);
- 30,0—31,3 ГГц (космос—Земля).

В каждом случае распределения частот для целей передачи времени и частоты — это распределения на вторичной основе, поэтому необходимо разработать широкие мероприятия по координации и разделению частот между основными и вторичными службами для гарантии того, что другим службам не создаются вредные помехи. Однако при наличии широкой полосы частот такие усилия могут иметь смысл, особенно в будущем, когда потребуются чрезвычайно высокая точность передачи времени (< 1 нс), что технически вполне достижимо.

В настоящее время эти частоты не используются для целей передачи времени и частоты и не планируется проведение каких-либо экспериментов в будущем. Для обеспечения рентабельного использования этих частот потребуются дальнейшая разработка аппаратуры, необходимой в этом диапазоне частот.

4.1.7 Одновременный прием сигналов измерения дальности

Предлагаемый метод состоит в одновременном приеме сигналов измерения дальности с соответствующих спутниковых систем в двух или более пунктах и сличении принятой фазы с выходными сигналами местных часов. Если такие измерения проводить в одно и то же время, чтобы использовать принятые сигналы для точного определения положения спутника, то погрешность разности задержек на трассе распространения будет очень низкой, в результате чего сличения времени двух часов можно провести с очень высокой точностью.

Всемирная метеорологическая спутниковая система, в состав которой входят спутники GOES, европейские спутники METEOSAT и японские спутники GMS, предоставляет возможность для использования данного метода при проведении региональных сличений шкал времени. В спутниковой системе GOES в настоящее время не предусмотрены соответствующие сигналы измерения дальности, однако спутниковые системы GMS и METEOSAT используют метод трилатерации для измерения дальности, который состоит в передаче соответствующего СВЧ сигнала измерения дальности несколько раз в день. В настоящее время существуют или могут появиться в будущем и другие спутниковые системы, которые хорошо подходят для использования такого метода передачи сигналов времени.

В 1970 году в NBS (США) был проведен эксперимент по оценке такого метода, в котором сигналы измерения дальности американских спутников LES-6 и TACSAT использовались для синхронизации часов, находящихся в Северной и Южной Америке [Hanson и Hamilton, 1971]. Хотя низкая разрешающая способность измерений дальности ограничивала точность синхронизации несколькими десятками микросекунд, была установлена основная возможность реализации этого метода. Исследования данного метода, проведенные в ФРГ, показывают, что использование двухметровых параболических антенн для приема сигналов измерений дальности, которые передаются со спутников METEOSAT каждые 3 часа, должно обеспечить точность синхронизации шкал времени на уровне 30 нс [Nottarp и др., 1979].

В Научно-исследовательской лаборатории связи (CRL) в Японии была разработана система сличений шкал времени с использованием сигналов спутника GMS-III для измерения дальности методом трилатерации, которая охватывает регионы Азии и Океании. Первый международный эксперимент по сличению шкал времени через спутник был проведен между CRL и Национальной лабораторией измерений Австралии, которая также разработала собственную систему, при этом был установлен прямой канал сличений шкал времени между Японией и Австралией. Погрешность сличений шкал времени составила 20 нс, а нестабильность частоты — 2×10^{-13} за время усреднения 1 сутки [Morikawa и др., 1986]. В проекте по сличению шкал времени с использованием спутника GMS также принимали участие Научно-исследовательский институт стандартов Республики Корея и Шанхайская обсерватория (Китайская Народная Республика).

4.2 Типы спутников, пригодные главным образом для обычных передач времени и частоты

4.2.1 Сигналы времени, принимаемые с метеорологических спутников

В настоящее время действуют 4 геостационарных спутника, которые осуществляют наблюдения за погодой и условиями окружающей среды на всемирной основе: 2 американских спутника GOES, расположенные над США, соответственно, на 75° и 135° з.д., европейский спутник METEOSAT, расположенный на долготе 0° , и японский спутник GMS, расположенный на 140° в.д. 2 спутника GOES — единственные спутники, которые имеют возможность передавать описанный ниже код времени, но благодаря их схожести с двумя другими спутниками когда-нибудь в будущем можно будет включить код времени как в европейский, так и в японский спутники. При работе спутниковой системы GOES в нормальном режиме ведущей контрольной станцией GOES на острове Уоллопс (Виргиния) через 2 действующих спутника США непрерывно передается запрос данных 100 бит/с на многочисленные платформы по сбору данных. Этот запрос передается по спутниковой линии вниз на двух частотах около 468 МГц и содержит код времени, предоставленный Национальным институтом стандартов и технологии США и срав-

ниваемый с его эталонным кодом [Hanson и др., 1979]. Этот код времени содержит информацию о годе, дне года, часе, минуте и секунде, а также данные о положении спутника, которые обновляются каждую минуту. Код также содержит указатели високосных годов, дополнительных секунд, летнего времени и текущих точностных характеристик системы. Имеется серийная приемная аппаратура, которая либо просто декодирует и выводит на экран дисплея информацию о времени суток с точностью ± 10 мс (± 1 мс, если пользователь вводит в полученные данные поправку на свое местоположение на Земле), либо автоматически декодирует данные о положении спутника, рассчитывает задержку сигнала на трассе и, соответственно, корректирует выходной сигнал 1 импульс/с, чтобы он находился в режиме реального времени в пределах 100 мкс. Сигналы синхронизации со спутников генерируются атомными стандартами частоты, которые NIST хранит на станции на острове Уоллопс [Beehler и др., 1979].

С 1974 года описанный выше код времени передается через 2 американских спутника GOES. Поскольку в этой системе производится замена спутников, предполагается, что все будущие американские спутники GOES будут продолжать передавать этот код. Опыт, полученный за этот период времени, свидетельствует о том, что:

- передаваемый код времени может неограниченно поддерживаться в пределах 10 мкс относительно шкалы UTC (NIST);
- вариации принимаемого кода времени (откорректированного на задержку распространения) обычно составляют несколько десятков микросекунд за сутки и < 100 мкс за более длительные интервалы времени, за исключением случайных, более значительных вариаций, происходящих из-за плохого качества элементов спутниковой орбиты, которые используются для прогнозирования местоположения [Beehler, 1982].

Код времени GOES весьма широко используется в Западном полушарии для контроля и мониторинга происшествий в системах энергоснабжения, корреляции зарегистрированных результатов наблюдений в сетях мониторинга сейсмических и других научных данных, синхронизации систем связи, измерений фазы в системах энергоснабжения и обычной калибровки часов.

4.2.2 Использование приемопередатчиков 400,1 МГц на спутниках

Всемирная административная радиоконференция по космической связи (Женева, 1971 г.) распредилила частоту $400,1 \pm 0,05$ МГц исключительно для спутниковых передач времени и частоты. Многие из общих потребностей в сигналах синхронизации со средним уровнем точности могли бы быть эффективно удовлетворены за счет передач сигналов времени в одностороннем режиме через приемопередатчик 400,1 МГц, установленный на одном или более спутниках. Использование распределенной ширины полосы частот ± 25 кГц обеспечило бы значительную гибкость в выборе формы сигнала синхронизации. В передаваемую информацию можно было бы включать речевые сообщения, радиосигналы точного времени, музыкальный тон и коды времени, как это делается сейчас в ВЧ службах. С другой стороны, было бы также возможно включить какой-либо тип PRN кода малого уровня, который можно было бы факультативно декодировать за более высокую плату за пользование для обеспечения более высокой точности, вероятно, даже на уровне субмикросекунды. Поскольку спутниковый сигнал синхронизации, по сути, носит международный характер, можно было бы также рассмотреть вопрос о передаче через спутниковый приемопередатчик только простого кода времени, который затем можно было бы легко состыковать в приемнике пользователя с твердотельными «говорящими микросхемами» (чипами) при хранении звуковой информации в цифровой форме, что позволило бы готовить на месте речевое сообщение о времени на любом необходимом языке. Разработка и внедрение таких служб обеспечили бы постепенный отказ от многих существующих в настоящее время наземных ВЧ служб времени и потенциальное решение проблемы уменьшения взаимных помех в ВЧ диапазоне.

Хотя никаких экспериментов по передаче сигналов времени на этой конкретной частоте не проводилось, возможность обеспечения такой спутниковой службы для обычных пользователей частотно-временной информации была доказана ранее. В августе 1973 года Национальное бюро стандартов завершило двухгодичный эксперимент по вещанию в одностороннем режиме формата типа WWV через спутник ATS-3 [Hanson и Hamilton, 1974]. Даже при относительно низкой частоте 135 МГц, которая использовалась для передач космос—Земля, была достигнута точность передачи времени в одностороннем режиме на уровне 25 мкс. Задержки на распространение для этого уровня точности можно было рассчитать, используя простую, специально разработанную для этой цели счетную линейку. Эксперимент с успехом продемонстрировал, что такие результаты может постоянно получать не совсем квалифицированный персонал после нескольких часов обучения. По сравнению с ВЧ радиовещательными передачами прием сигналов со спутника оказался гораздо более надежным, а для его осуществления требовались простые способы приема и сравнительно недорогая и несложная аппаратура. Несмотря на то что сигналы времени спутника ATS-3 носили экспериментальный характер и их передача ограничивалась двумя 15-минутными периодами в сутки, интерес к этому методу был доказан тысячами поступавших в NBS запросов на информацию.

В настоящее время нет каких-либо известных планов по использованию распределенной частоты 400,1 МГц.

4.2.3 Особые возможности при использовании спутников связи

Прямой метод использования арендованных каналов на спутниках связи для передачи сигналов времени обсуждался ранее в связи с высокоточными альтернативными методами передачи из пункта в пункт, когда имеющаяся большая ширина полосы необходима для достижения наивысших характеристик. Однако в особых обстоятельствах могут быть и другие методы использования этих универсальных спутников для обычных передач времени и частоты. Одно из выдвинутых предложений состоит в использовании для передачи времени ОНЧ приемопередатчиков, находящихся на борту таких спутников. Эти приемопередатчики применяются главным образом в процессе первоначальных маневров выведения спутника на орбиту и, таким образом, могут быть пригодны для выполнения других вспомогательных задач, как только спутник займет твердое положение на своей рабочей орбите.

Национальный электротехнический институт (IEN) в Италии использовал такой приемопередатчик на экспериментальном спутнике связи Sirio-1 вместе с ОНЧ приемопередатчиком, работающим на частоте 136 МГц [Detoma и др., 1981]. В этом эксперименте использовался также СВЧ приемопередатчик, работающий на частоте 17 ГГц на линии связи вверх и 14 ГГц на линии связи вниз. Испытания были проведены с использованием кодированного сигнала времени [Detoma и др., 1983]. Ширина полосы в обоих случаях (ОВЧ и СВЧ диапазоны) составляла несколько килогерц. Стандартная девиация в эксперименте с ОВЧ приемопередатчиком составила 1,5 мс, а в эксперименте с СВЧ приемопередатчиком — 30 мкс.

В период 1977—1979 годов Индия, воспользовавшись наличием на орбите спутника «Симфония-1», провела эксперименты по передаче сигналов времени. Распространялись следующие виды информации со следующей измеренной стандартной девиацией:

- стандартный ВЧ формат вещания, аналогичный формату спутника АТА, 5 нс;
- код времени;
- сигналы времени в прямом телевизионном вещании, 70 нс. В случае использования телевидения была подтверждена точность передачи на уровне 0,25 мкс.

В одном конкретном случае (Индия) разрабатывается система, обеспечивающая возможный доступ NPL к некоторой части спектра индийского национального спутника связи INSAT для особой задачи — передачи сигналов времени на рабочей основе. В частотном канале S-полосы (приблизительно 2 ГГц) можно выделить канал 10 кГц; в настоящее время осуществляется планирование по обеспечению полного сигнала времени, включающего в себя информацию о положении спутника для расчета пользователями поправок на одностороннюю задержку на трассе.

4.3 Типы спутников, пригодные как для высокоточных, так и для обычных передач

4.3.1 Навигационная система TRANSIT

В состав навигационной системы TRANSIT США в настоящее время входит 7 действующих спутников на полярной орбите, которые непрерывно передают навигационные сигналы/сигналы времени на двух частотах — 150 и 400 МГц. Время, соотнесенное со шкалой Военно-морской обсерватории США, можно выделить из принятых за основу временных меток, передаваемых каждые 2 минуты, а также определяя задержку на трассе распространения из информации об эфемеридах спутника, включенную в формат сигнала спутника TRANSIT. Шкала времени генерируется на спутнике кварцевыми генераторами, которые по мере необходимости корректируются с наземных контрольных станций, чтобы принимаемая шкала находилась в пределах ± 100 мкс по отношению к UTC (USNO). В настоящее время имеются серийные приемники, которые могут автоматически усреднять время, переданное выбранным числом спутников TRANSIT, и выбранное количество их прохождений. При разумном выборе спутников и усреднении прохождений спутников в заданном месте обычный пользователь может иметь доступ к первичным часам, которые обычно находятся в пределах ± 10 мкс от UTC (USNO).

Система TRANSIT, в состав которой входят 7 спутников, задействована полностью и будет продолжать предоставлять обслуживание по крайней мере до 1997 года. Система обеспечивается BMC США, которые публикуют поправки, согласующие время каждого спутника TRANSIT с UTC (USNO).

Поскольку система TRANSIT находится в эксплуатации с 1965 года, то накоплен большой опыт по ее использованию. При одностороннем приеме сигналов системы TRANSIT обеспечивается синхронизация по шкале UTC (USNO) с погрешностью ± 20 мкс, таким образом, эти сигналы служат весьма ценным источником частотно-временной информации для нужд обычного распространения такой информации [Laidet, 1972; Beehler и др., 1979].

4.3.2 Телевизионные вещательные спутники

Во многих странах регулярно проводятся наземные сличения шкал времени по каналам телевидения как в пределах местных зон, так и на больших расстояниях путем одновременного приема синхроимпульсов в составе обычного формата телевизионного сигнала на двух пунктах. Если оба пункта находятся в пределах радиуса действия одного телевизионного передатчика, то можно измерить разницу во времени часов с погрешностью приблизительно 100 нс или менее в предположении, что можно также определить дифференциальную задержку на трассе распространения. Этот метод можно использовать и на больших расстояниях, когда принимаются сигналы 2 различных телевизионных передатчиков, связанных между собой в одной телевизионной сети. При существующей тенденции развития телевизионного вещания с использованием предназначенных для этой цели спутников вполне реальным может стать применение тех же телевизионных методов синхронизации шкал времени для телевизионных спутников [Kovačević и др., 1979 и 1981]. Спутниковые телевизионные импульсы можно уверенно принимать на больших территориях и измерять относительно местных часов с высоким разрешением (несколько наносекунд). Однако точность, с которой можно сличить двое часов, зависит от знания дифференциальной задержки на трассе распространения. Имеется одна интересная идея, которая состоит в том, чтобы точно определять положение телевизионного спутника с помощью нескольких лазерных дальнометров, а затем использовать эту информацию для вычисления задержек на трассе. МБВ предложило другой вариант, заключающийся в использовании метода LASSO для калибровки времени излучения телевизионного импульса со спутника, который затем будет использоваться для передачи времени индивидуальным пользователям с помощью метода одностороннего приема импульса. Третья возможность состоит в очень точном определении положения спутника с помощью двустороннего метода, который применяют как минимум 3 наземные передающие станции [Kovačević и др., 1981; Hartl и др., 1983]. Существует еще один метод использования телевизионных вещательных спутников; в этом случае особое внимание уделяется обычной передаче шкал времени, при которой кодированная информация о времени суток вводится в вертикальный гасящий интервал телевизионного сигнала. Затем его можно принять в пределах обширных зон приема и декодировать с умеренной точностью, которая вполне достаточна для многих нужд в области хранения времени.

Несколько экспериментальных телевизионных вещательных спутников в настоящее время анализируются, а в ряде случаев используются при исследовании проблем передачи времени и частоты. В Японии были проведены предварительные эксперименты по передаче частоты с использованием экспериментального вещательного спутника средних размеров (BSE), который работает на частоте 12 ГГц на линии вниз и на частоте 14 ГГц на линии вверх. Измеренная кратковременная нестабильность принимаемой телевизионной поднесущей частоты была такой же, как и при наземном телевизионном вещании, например, $\sigma_y(10\text{с}) = 3 \times 10^{-11}$. Чтобы выбрать метод устранения сдвига доплеровской частоты, были проведены испытания с использованием системы фазовой автоподстройки частоты, включенной в спутниковую линию, или предварительной компенсации частоты с использованием измеренных значений орбитальных данных спутника. Величину остаточного доплеровского сдвига на станции управления можно снизить примерно до 1×10^{-12} или менее с помощью первого и второго методов. Предполагается, что метод, где используются данные орбиты, даст контрольное значение порядка нескольких единиц на 10^{11} . Максимальное значение доплеровского сдвига частоты в самом удаленном пункте страны, который находится на расстоянии 1500 км от передающей станции BSE, по оценкам, составляет $\pm 2 \times 10^{-10}$ без каких-либо поправок [Ishida и др., 1979; Saburi и др., 1979].

В результате дальнейших экспериментов с использованием спутника BSE в пункте, находящемся на расстоянии 1000 км от передающей станции, была получена погрешность передачи частоты 5×10^{-12} (1σ) после внесения в измеренную величину расчетной поправки, основанной на данных орбиты. Еще один результат экспериментов: при сличениях времени, проводившихся с использованием телевизионного синхроимпульса (в течение 5 месяцев) между двумя цезиевыми часами, расположенными на расстоянии 400 км друг от друга, была получена точность на уровне 0,2 мкс (1σ) и разрешение 0,12 мкс (1σ). В эксперименте по передаче эталонных сигналов времени, в котором использовался код времени, включенный в вертикальный гасящий интервал, на всей территории страны была получена точность на уровне 10 мкс, когда на передающей станции осуществлялась автоматическая коррекция доплеровского сдвига [Saburi и др., 1980].

В 1982—1986 годах Государственным институтом метрологии (NIM) Китая были проведены эксперименты по передаче в одностороннем режиме эталонных сигналов частоты и времени с использованием спутника INTELSAT-V и китайского экспериментального спутника связи STW-1, в ходе которых код времени и эталонная частота 1 МГц были введены в 16-ю строку вертикальных гасящих интервалов телевизионных сигналов. В приемнике использовалась система фазовой автоподстройки частоты для повышения отношения сигнал/шум принимаемого сигнала. В этих экспериментах была получена сходимость 3 нс. Погрешность синхронизации составляла менее 200 нс, когда вводилась поправка на задержку. Когда на передающей станции осуществлялась автоматическая коррекция доплеровского сдвига, погрешность передачи частоты составляла менее чем 3×10^{-12} [Cuiying Xiao, 1987].

В 1980—1983 годах в Европе был проведен эксперимент по сличению шкал времени, в котором участвовали VSL, NPL, IEN, DFVLR, TUG и PTB, с использованием телевизионных сигналов, ретранслируемых европейским экспериментальным спутником связи OTS-2 на частоте 11,682 ГГц. В октябре 1983 года в течение недели можно было сравнивать результаты измерений при передачах сигналов времени и частоты через спутники OTS-2 и NAVSTAR/GPS между IEN и TUG. Относительная разность частот, полученная при измерениях с использованием спутников OTS-2 и GPS, составила менее чем 3×10^{-14} , а стандартная девиация обоих типов измерений — менее 20 нс [Kircher и др., 1985].

Измерения с помощью спутника OTS-2 показали, что будет возможно создать линии сличений времени и частоты высокого качества с использованием спутников прямого телевизионного вещания. Для высокоточных сличений шкал времени, безусловно, потребуются калибровать задержки в приемной аппаратуре [De Jong и др., 1981; De Jong и Kaarls, 1983].

С июля 1988 года и по настоящее время (1989 год) проводится эксперимент по синхронизации шкал времени Национального электротехнического института (IEN) в Турине и других европейских лабораторий (TP, TUG, AOS, ASMW и VSL), который основан на использовании телевизионных сигналов, принимаемых с геостационарного спутника ECS5.

Полученные результаты показали, что на очень больших территориях достигается погрешность от нескольких сот наносекунд до 1 мкс при условии, что в результаты измерений вводятся поправки на параметры местоположения спутника, определяемые на станции слежения ЕКА [Buzek и др., 1989].

При небольших расстояниях между лабораториями, участвующими в эксперименте, для расчета задержек на трассе распространения будут достаточны стандартные процедуры определения орбиты, используемые для спутников связи. Для больших расстояний положение спутника должно быть определено по возможности очень точно; это можно сделать путем прецизионных измерений дальности, которые проводят сами лаборатории хранения времени, что и продемонстрировали измерения, проведенные в Граце, где было получено качество измерений, сравнимое с результатами измерений на СВЧ станциях слежения [Kerchner и др., 1984].

4.4 Сравнения различных вариантов спутниковых систем и методов

В таблице I приводится дополнительная сравнительная информация о различных вариантах спутниковых систем, включая зону охвата, точностные характеристики, некоторые оценки затрат пользователя, а также указание на то, возможен ли при применении данного варианта прием в пункте в отличие от потребности в дополнительных линиях передачи времени к приемному оборудованию, находящемуся вне пункта. В таблице указаны также данные о состоянии системы или метода, исходя из того, являются ли они только экспериментальными или действуют в эксплуатационном режиме. В таблице II в сжатой форме указаны некоторые основные преимущества и недостатки различных спутниковых систем.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

СПУТНИКОВЫЕ СЛИЧЕНИЯ ВРЕМЕНИ/ЧАСТОТЫ

Год	Организация и ссылка на источник	Спутник	Метод и описание	Установленная точность передачи (А) или разрешение (Р)
1962	USNO/США, NPL/Соединенное Королевство, RGO/Соединенное Королевство [Steele и др., 1964]	TELSTAR 6390 МГц	Двусторонний	1 мкс (А); только спутниковая линия 20 мкс (А); общая линия
1965	USNO/США, RRL ⁽¹⁾ /Япония [Markowitz и др., 1966]	RELAY-II 1723 МГц (линия вверх) 4175 МГц (линия вниз)	Двусторонний	0,1 мкс (А) 0,01 мкс (Р)
1967	NBS/США [Gatterer и др., 1968]	ATS-1 136 МГц	Односторонний	10—60 мкс (А)
1967	NBS/США [Jespersen и др., 1968]	ATS-1 149 МГц (линия вверх) 136 МГц (линия вниз)	Двусторонний	< 5 мкс (А)
1968	НАСА/США [Laios, 1972]	GEOS-2 136 МГц	Односторонний; бортовые кварцевые часы космического корабля	20 мкс (А)
1969	CNES/Франция [Laidet, 1972]	TRANSIT 400 МГц	Односторонний; бортовые кварцевые часы космического корабля	20 мкс (А)
1970	NRL/США [Murray и др., 1971]	Министерство обороны США, спутник связи X-диапазона	Двусторонний	0,1—0,2 мкс (А)
1970	NBS/США [Hanson и Hamilton, 1971]	TACSAT/LES-6 сигналы измерения дальности на боковой тональной полосе на несущей частоте 250 МГц	Односторонний с использованием сигналов измерения дальности с низким разрешением	40 мкс (А)
1971	НАСА/США [Mazur, 1972]	ATS-3 6212 МГц (линия вверх) 4119 МГц (линия вниз)	Двусторонний	50—70 нс (А)
1971	NBS/США [Hanson и Hamilton, 1974]	ATS-3 136 МГц	Односторонняя передача сигналов WWW через спутниковый приемопередатчик	25 мкс (А) 10 мкс (Р)
1974	APL/JHU/США [Taylor, 1974]	Усовершенствованный TRANSIT 150 МГц 400 МГц	Односторонний; бортовые часы космического корабля; PRN кодированный сигнал	< 75 нс (А) 10 нс (Р)
1974	НАСА/США, ФАУ/США [Chi и Вутон, 1975]	ATS-1 6301 МГц (линия вверх) 4178 МГц (линия вниз)	Двусторонний; PRN кодированный сигнал	50 нс (А) 20 нс (Р)
1975	NRL/США, USNO/США, RGO/Соединенное Королевство, DNM/Австралия	NTS-1 335 МГц	Односторонний; Бортовые часы космического корабля	< 500 нс (А) 50 нс (Р)
1975	RRL ⁽¹⁾ /Япония НАСА/США, USNO/США [Saburi и др., 1976]	ATS-1 6 ГГц (линия вверх) 4 ГГц (линия вниз)	Двусторонний с использованием системы связи с произвольным доступом и расширенным спектром	10 нс (А) 1 нс (Р)

ПРИЛОЖЕНИЕ I (продолжение)

Год	Организация и ссылка на источник	Спутник	Метод и описание	Установленная точность передачи (А) или разрешение (Р)
1975	NBS/США [Beehler и др., 1979]	GOES 468 МГц	Односторонний	< 100 мкс (А)
1976	CNES/Франция, LPTF/Франция, РТВ/ФРГ [Brunet, 1979]	Symphonie 6 ГГц (линия вверх) 4 ГГц (линия вниз)	Двусторонний	50 нс (А) < 10 нс (Р)
1978	DNM/Австралия, NRC/Канада, RGO/Соединенное Королевство МБВ, IFAG/ФРГ, НАСА/США, NBS/США, NRL/США, USNO/США [Buisson и др., 1978]	NTS-1 NTS-2 335 МГц 1580 МГц	Односторонний; бортовые часы космического корабля	< 1 мкс (А)
1979	NRC/Канада, NBS/США, USNO/США, LPTF/Франция [Costain и др., 1979]	CTS/Hermes Symphonie 4/6 ГГц 12/14 ГГц	Двусторонний	50 нс (А) 0,2 нс (Р)
1979	NPL/Индия, РТВ/ФРГ [Mathur и др., 1980]	Symphonie 4/6 ГГц	Двусторонний	< 100 нс (А) < 10 нс (Р)
1979	IEN/Италия [Detoma и Leschiutta, 1980]	SIRIO-1 12/17 ГГц	Двусторонний; один канал с временным разделением	50—100 нс (А) 1—5 нс (Р)
1979	NIM/КНР, РТВ/ФРГ, SO и CSAO/КНР, LPTF/Франция	Symphonie Symphonie	Двусторонний Двусторонний	< 80 нс (А) < 10 нс (Р) < 100 нс (А) < 10 нс (Р)
с 1980	NBS/США, USNO/США, МБВ/Франция, LPTF/Франция, РТВ/ФРГ, NRL/США, VSL/Нидерланды, TUG/Австрия, ТАО/Япония, JPL/США, RRL ⁽¹⁾ /Япония	GPS	Одновременное наблюдение	< 100 нс (А) 10—30 нс (Р) (20 нс (А) и 1—10 нс (Р) было получено в 1987 г.)
1980	RRL ⁽¹⁾ /Япония [Saburi и др., 1980]	BSE	Односторонний	5×10^{-12} (1000 км) (А) 0,2 мкс (А) 0,12 мкс (Р)
1978—1982	NRC/Канада, LPTF/Франция, CNES/Франция	Symphonie	Двусторонний	0,5 нс (Р)
1980—1982	РТВ/ФРГ	Symphonie	Двусторонний	0,5 нс (Р)

ПРИЛОЖЕНИЕ I (продолжение)

Год	Организация и ссылка на источник	Спутник	Метод и описание	Установленная точность передачи (А) или разрешение (Р)
с 1981	RRL ⁽¹⁾ /Япония [Imae и др., 1983]	CS 30/20 ГГц	Двусторонний, для SSRA диаметр антенны 1,3—2 м Двусторонний, для SSRA диаметр антенны 1—2 м	1 нс (Р) 13 нс (А) 1 нс (Р) 13 нс (А)
1982	VSL/Нидерланды, NPL/Соединенное Королевство, IEN/Италия, DFVLR, PTB/ФРГ, TUG/Австрия [De Jong и др., 1981, De Jong и Kaarls, 1983]	OTS-2	Односторонний	300 нс (А) 20 нс (Р)
1982	NIM/КНР	INTELSAT-V	Односторонний	2 нс (Р) 5×10^{-11} (А)
1983	USNO/США, COMSAT/США, DFVLR/ФРГ [Hartl, 1983]	INTELSAT-V	Двусторонний	300—500 нс (Р)
1984— 1986	NIM/КНР	STW-1	Односторонний Двусторонний с использованием системы связи с произвольным доступом и расширенным спектром	3 нс (Р) 200 нс (А) 3×10^{-12} (А) 1 нс (Р) 10 нс (А)

Примечание к таблице

(1) В настоящее время — CRL (Научно-исследовательская лаборатория связи).

ССЫЛКИ

- ALLAN, D.W., DAVIS, D.D., WEISS, M., CLEMENTS, A., GUINOT, B., GRANVEAUD, M., DORENWENDT, K., FISHER, B., HETZEL, P., AOKI, S., FUJIMOTO, M.K., CHARRON, L. and ASHBY, N. [June 1985] Accuracy of international time and frequency comparisons via global positioning system satellites in common-view. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-34, 2, 118—125.
- ALLAN, D.W. and WEISS, M.A. [May 1980] Accurate time and frequency transfer during common-view of a GPS satellite. Proc. 34th Annual Symposium on Frequency Control, Philadelphia, Pa., USA (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 334—347 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).
- AOKI, S., FUJIWARA, K. and YAMAZAKI, T. [1984] Loran-C versus GPS. *Time and Latitude Bull.*, Tokyo Astronomical Observatory, Vol. 58, 25.
- BEEHLER, R.E. [December 1982] GOES satellite time code dissemination. Proc. 14th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA.
- BEEHLER, R.E., DAVIS, D.D., CATEORA, J.V., CLEMENTS, A.J., BARNES, J.A. and MENDEZ-QUINONES [November 1979] Time recovery measurements using operational GOES and TRANSIT satellites. Proc. 11th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA, 283—315.
- BRUNET, M. [July—August 1979] Synchronization of atomic clocks through the «Symphonie» satellite. *Radio Sci.*, Vol. 14, 4, 721—730.
- BUISSON, J., McCASKILL, T., OAKS, J., LYNCH, D., WARDRIP, C. and WHITWORTH, G. [November 1978] Submicrosecond comparisons of time standards via the Navigation Technology Satellites (NTS). Proc. 10th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA, 601—629.
- BUISSON, J.A., OAKS, O.J., LISTER, M.J. [1985] Remote calibration and time synchronization (R-CATS) between major time observatories and the US Naval Observatory using GPS. Proc. 17th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA, 201—211.
- BUZEK, O., CERMAK, J., VONDRAK, J., CORDARA, F., GALLIANO, P.G., PETTTI, V. and TAVELLA, P. [March 1989] Synchronization of time scales by television method using ECS satellites — Preliminary results. Proceedings 3rd European Time and Frequency Forum, Besançon.
- CHI, A.R. and BYRON, E. [December 1975] Two-way time transfer experiment using a synchronous satellite. Proc. Seventh Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA, 357—377.
- CLEMENTS, P., BORUTZKI, S. and KIRK, A. [1984] Maintenance of time and frequency in the Jet Propulsion Lab's deep space network using the global positioning system. Proc. 16th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA.
- COOPER, R.S. and CHI, A.R. [July—August 1979] A review of satellite transfer technology: accomplishments and future applications. *Radio Sci.*, Vol. 14, 4, 605—619.
- COSTAIN, C.C. et al. [1979] Two-way time transfer via geostationary satellites NRC/NBS, NRC/USNO and NBS/USNO via Hermes and NRC/LPTF (France) via Symphonie. Proc. 11th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA, 499—520.
- COSTAIN, C.C., DAAMS, H. and BOULANGER, J.-S. [1982] Two-way satellite time transfer using low power CW tones. Proc. 14th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA, 31—37.
- COSTAIN, C.C., DAAMS, H., BOULANGER, J.-S. and DOUGLAS, R. [1983] Time dissemination from the National Research Council of Canada. Proc. 37th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703) (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).
- CUIYING XIAO [1981] Clock synchronization experiment via Symphonie satellite. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-30, 4, 273—277.
- CUIYING XIAO [1987] Satellite time transfer technique and the advances in space science technology in the Pacific Basin. *PISSTA* 1987, 385—392.

- DALY, P. [1988] Aspects of the Soviet Union's GLONASS satellite navigation system. *J. of Navigation*, 41(2), 186—198.
- DALE, S.A., DALY, P. and KITCHING, I.D. [1989] Understanding signals from GLONASS navigation satellites. *Int. J. of Satellite Comms.*, 7, 11—22.
- DAVIS, D.D., WEISS, M., CLEMENTS, A. and ALLAN, D.W. [December 1981a] Unprecedented syntonization and synchronization accuracy via simultaneous viewing with GPS receivers and construction characteristics of an NBS/GPS receiver. Proc. 13th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA, 527—547.
- DAVIS, D.D., WEISS, M., CLEMENTS, A. and ALLAN, D.W. [May 1981b] Construction and performance characteristics of a prototype NBS/GPS receiver. Proc. 35th Annual Symposium on Frequency Control, Philadelphia, Pa., USA (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703) (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).
- DE JONG, G. and KAARLS, R. [April 1983] Report on time synchronization via OTS-2. EEC, Bureau of Reference, Brussels, Belgium.
- DE JONG, G., KAARLS, R., KIRCHNER, D. and RESSLER, H. [December 1981] Time comparison via OTS-2. Proc. 13th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA, 347—367.
- DETOMA, E. and LESCHIUTTA, S. [December 1980] Two-way sequential time synchronization: preliminary results from the SIRIO-1 experiment. Proc. 12th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA, 329—351.
- DETOMA, E. et al. [1981] Time code dissemination experiment via the SIRIO-1. NASA Conf. Publ. 2220, 469—488. Proc. 13th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA.
- DETOMA, E., LESCHIUTTA, S. and PETTITI, V. [1983] Disseminazione di segnali di tempo via satellite geostazionario. *Elettronica e Telecomunicazioni*, Vol. 32, 4, 163—169.
- EASTON, R.L., FISHER, L.C., HANSON, D.W., HELLWIG, H.W. and RUEGER, L.J. [October 1976] Dissemination of time and frequency by satellite. *Proc. IEEE*, Vol. 64, 1482—1493.
- FUJIMOTO, M.-K., FUJIWARA, K. and AOKI, S. [1983] International time comparison by a GPS time receiver. Proc. 15th Annual Precise Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA.
- GATTERER, L.E., BOTTONNE, P.W. and MORGAN, A.H. [December 1968] Worldwide clock synchronization using a synchronous satellite. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-17, 4, 372—378.
- GUINOT, B., LEWANDOWSKI, W. [1987] Use of the GPS time transfer at the International Bureau of Weights and Measures. Proc. 19th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Redondo Beach, California, USA.
- HANSON, D.W. and HAMILTON, W.F. [September 1971] Clock synchronization from satellite tracking. *IEEE Trans. Aerospace Electron. Systems*, Vol. AES-7, 5, 895—899.
- HANSON, D.W. and HAMILTON, W.F. [September 1974] Satellite broadcasting of WWV signals. *IEEE Trans. Aerospace Electron. Systems*, Vol. AES-10, 5, 562—573.
- HANSON, D.W., DAVIS, D.D. and CATEORA, J.V. [July—August 1979] NBS time to the western hemisphere by satellite. *Radio Sci.*, Vol. 14, 4, 731—740.
- HARTL, Ph., GIESCHEN, N., MÜSSENER, K.M. and SHAFER, W. [1983] High-accuracy global time transfer via geosynchronous telecommunications satellites with Mitrex. *Z. Flugwiss. Weltraumforsch.*, Vol. 5, 7, 335—342.
- HOWE, D.A. [November 1987] Progress toward one nanosecond two-way time transfer accuracy using ku-band geostationary satellites. *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. UPFC-34, No. 6, 639—646.
- ICAO [1988] GLONASS system. Input Document by the USSR to the 4th Meeting of FANS Committee, International Civil Aviation Organization, Montreal, Canada.
- IMAE, M., OKAZAWA, H., SATO, T., URAZUKA, M., YOSHIMURA, K. and YASUDA, Y. [1983] Time comparison experiments with small K-band antennas and SSRA equipments via a domestic geostationary satellite. *IEEE Trans. Instr. Meas.* Vol. 32, 1, 199—203.

- IMAE, M., URATSUKA, M., MIKI, C., MORIKAWA, T., AKATSUKA, K. and YOSHIMURA, K. [1985] Development of a GPS time transfer receiver and time comparison results. Proc. 39th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703) (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).
- ISHIDA, T., SOEJIMA, S. and ICHIKAWA, Y. [December 1979] Present situation of Japanese satellite broadcasting for experimental purpose. *IEEE Trans. Broadcasting*, Vol. BC-25, 4, 105—112.
- JESPERSEN, J., KAMAS, G., GATTERER, L. and MacDORAN, P. [July 1968] Satellite VHF transponder time synchronization. *Proc. IEEE*, Vol. 56, 7, 1202—1206.
- KIRCHNER, D., KOUDIELKA, O. and RIEDLER, W. [1984] Range measurements of the OTS-2 satellite by means of a STELLA terminal. *ESA J.*, 8, 133—142.
- KIRCHNER, D., RESSLER, H., CORDARA, F., GALLIANO, P.G. and PETTITI, V. [June 1985] A comparison of time and frequency measurements via OTS-2 with results obtained by NAVSTAR/GPS and LORAN-C. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-34, 2, 126—129.
- KIRCHNER, D., RESSLER, H., RIEDLER, W. and SÖRING, A. [September 1988] A two-way time transfer experiment via ECS-1 using the MITREX modem. *Trans. IEEE Instr. Meas.*, Vol. IM-37, 3, 414—417.
- KIRCHNER, D., RESSLER, H. and SÖRING, A. [1986] Messungen mit dem MITREX-Modem. Actes du Congrès de Chronométrie, La Chaux-de-Fonds, 71—75.
- KLEPCZYNSKI, W.J. [1982] Systematic effects in GPS time transfer. Proc. 14th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA, 491.
- KLEPCZYNSKI, W.J., WHEELER, P.J., POWELL, W., JEFFRIES, A., MEYERS, A., CLARKE, R.T., HANSON, W., JESPERSEN, J., and HOWE, D. [June 1988] Preliminary comparisons between GPS and two-way satellite time transfer. Proc. 42nd Annual Symposium on Frequency Control, Baltimore, MD, USA (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 472—477 (Electronic Industries Association, Washington, DC 2006, USA).
- KOVAČEVIĆ, B., DIMITRIJEVIĆ, B., ARSIĆ, M. and GOLUBOBIĆ, L. [October 1981] Precise international T/F comparisons via ground and satellite TV systems. *J. Inst. Electron. Telecom. Engrs.*, Vol. 27, 10, 450—456.
- KOVAČEVIĆ, B., DIMITRIJEVIĆ, B., ARSIĆ, M. and KOVAČEVIĆ, N. [1979] Precise real-time signal dissemination over the TV broadcasting satellite. *Radio Sci.*, Vol. 14, 4, 685—694.
- LAIDET, L.M. [May 1972] Worldwide synchronization using the TRANSIT satellite system. *Proc. IEEE (Lett.)*, Vol. 60, 5, 630—632.
- LAIOS, S.C. [May 1972] Satellite time synchronization of a NASA network. *Proc. IEEE (Lett.)*, Vol. 60, 5, 632—633.
- LEWANDOWSKI, W., WEISS, M., DAVIS, D. [1986] A calibration of GPS equipment at time and frequency standards laboratories in the USA and Europe. Proc. 18th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA, 265—279.
- MARKOWITZ, W., LIDBACK, C.A., UYEDA, H. and MURAMATSU, K. [December 1966] Clock synchronization via Relay II satellite. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-15, 4, 177—184.
- MATHUR, B.S., BANERJEE, P., SOOD, P.C., SAXENA, M., KUMAR, N. and SURI, A.K. [December 1980] Precise time and frequency intercomparison between NPL, India, and PTB, Federal Republic of Germany, via satellite Symphonie-1. Proc. 12th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA, 863—875.
- MAZUR, W.E. Jr. [May 1972] Dual transponder time synchronization at C band using ATS-3. *Proc. IEEE (Lett.)*, Vol. 60, 5, 633—634.
- MILLIKEN, R.J. and ZOLLER, D.J. [Summer 1978] Principle of operation of NAVSTAR and system characteristics. *Navigation*, Vol. 25, 2, 95—106.

- MORIKAWA, T., MIKI, C., URATSUKA, M., IMAE, M. and YOSHIMURA, K. [1986] Precise Time Comparisons in Asian-Oceanian Area via the Geostationary Meteorological Satellite of Japan. Proc. of 15th International Symposium on Space Technology and Science, 1737—1742.
- MURRAY, J. A., PRITT, D.L., BLOCKER, L.W., LEAVITT, W.E., HOOTEN, P. M. and GORING, W.D. [April 1971] Time transfer by Defense Communications Satellite. Proc. 25th Annual Symposium on Frequency Control, Atlantic City, NJ, USA (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 186—193 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).
- NOTTARP, K., SCHLÜTER, W. and HÜBNER, U. [November 1979] One-way time transfer via METEOSAT capable of 30 ns accuracy. Proc. 11th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA, 329—343.
- PUTKOVICH, K. [December 1980] USNO GPS program. Proc. 12th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA.
- RAWLEY, L.A., TAYLOR, J.H., DAVIS, M.M. and ALLAN, D.W. [6 November 1987] Millisecond pulsar PSR 1937+21: A highly stable clock. *Science*, Vol. 238, 761—765.
- SABURI, Y., YAMAMOTO, M. and HARADA, K. [December 1976] High-precision time comparison via satellite and observed discrepancy of synchronization. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-25, 4, 473—477.
- SABURI, Y., YASUDA, Y., KOBAYASHI, S. and SATO, T. [November 1979] T & F comparison via broadcasting satellite and Navigation Technology Satellite. Proc. 11th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA, 315—329.
- SABURI, Y., YASUDA, Y., KOBAYASHI, S., SATO, T. and IMAE, M. [1980] Experiment of standard frequency and time signal dissemination via the BSE. 31st Congress International Astronautical Federation (IAF).
- SERENE, B. [December 1980] Progress of the LASSO experiment. Proc. 12th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA, 307—327.
- SERENE, B. and ALBERTINOLI, P. [November 1979] The LASSO experiment. Proc. 11th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA, 145—171.
- STARKER S., NAU, H. and HAMMESFAHR, J. [November 1987] The NAVEX Experiment in the Spacelab Mission Planning and Execution. ESA-TT-1078, Translation of DFVLR-FB-87-03.
- STARKER, S., NAU, H., HAMMESFAHR, J. and TSCHIESCHE, H. [1982] NAVEX — a space shuttle experiment with atomic clocks. Proc. 14th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA, 181—202.
- STARKER, S. and SAPPL, E. [16—18 May 1988] Time Scales and their estimated Uncertainties in the space Shuttle Experiment NAVEX. Proc. of the 2nd European Frequency and Time Forum, Neuchatel, Switzerland.
- STEELE, J. McA., MARKOWITZ, W. and LIDBACK, C.A. [December 1964] Telstar time synchronization. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-13, 4, 164—170.
- TAYLOR, R.J. [29—31 May 1974] Satellite-to-ground timing experiments. Proc. 28th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 384—388 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).
- USNO [1985] United States Naval Observatory Time Service Announcement, Series 16.

WARDRIIP, C., BUISSON, J., OAKS, O., LISTER, M., STEBRINS, S., GUINOT, B., GRANVEAUD, M., FREON, G., DUBOUIS, B., SCHLUTER, W., NOTTARP, K., REINHARDT, V., KRUGER, R., DACHEL, P. and DETOMA, E. [1983] An international time transfer experiment via the Global Positioning System (GPS). Proc. 37th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703) (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).

YIN-BAI ZHANG and ZONG-YANG LI [1988] Astronautical Measurement Technique, No. 3.

YOSHIMURA, K., IMAE, M., URAZUKA, M., MORIKAWA, T., YOSHINO, T., KOBAYASHI, S. and IGARASHI, T. [January 1986] Research activities on time and frequency transfer using space links. *Proc. IEEE*, Vol. 74, 1, 157—160.

ЛИТЕРАТУРА

Документы МККР

[1978—82]: 7/131 (Италия).

ОТЧЕТ 576-3

ПЕРЕДАЧА СТАНДАРТНОЙ ЧАСТОТЫ ПОСРЕДСТВОМ СТАБИЛИЗАЦИИ НЕСУЩЕЙ ВЕЩАТЕЛЬНОЙ СТАНЦИИ

(Исследовательская программа 4А/7)

(1974—1978—1982—1986)

Большому числу пользователей информации, передаваемой службами стандартных частот и сигналов времени, особенно в радио- и электронной промышленности, необходимы эталоны частоты с умеренной точностью. Эти пользователи обычно территориально расположены в местах с сильными электромагнитными помехами, которые могут значительно снизить возможность использования передач стандартных частот и сигналов времени в распределенных и других полосах частот. Кроме того, существует потребность в простом и недорогом оборудовании для проведения подобных сличений частот.

В Европе этим требованиям удовлетворяют некоторые службы стандартных частот и сигналов времени, действующие в диапазоне 5, со стабилизацией несущих частот вещательных станций: Аллуи, 162 кГц; Донебах, 153 кГц; Дройтуич, Уэстерглен, Бергхед, 198 кГц; Мотала, 189 кГц и Милан I, 900 кГц. Несущие частоты перечисленных станций стабилизированы атомными стандартами частоты. Более подробная информация о некоторых из этих станций дана в Отчете 267.

Зона обслуживания, с учетом характеристик распространения сигналов в НЧ диапазоне и в зависимости от мощности излучения, может быть очень большой (с радиусом порядка нескольких сот километров). В указанной зоне сличения частот возможны с погрешностью между 1×10^{-11} и 1×10^{-9} при условии, что измерения проводятся в дневные часы с достаточно долгим периодом измерения.

Подобные эксперименты проводились в Соединенных Штатах Америки в диапазоне 6 со стабилизацией несущей частоты вещательной станции 650 кГц и при мощности несущей 50 кВт. Погрешность сличения частот в дневные часы на расстоянии 800 км составила 1×10^{-10} .

В Федеративной Республике Германии около 160 телевизионных передатчиков работают в диапазоне 9 с несущими частотами, которые дистанционно синхронизируются с использованием стандартной частоты 10 МГц, получаемой через каналы распределения телевизионных программ по радиорелейным линиям. Средний нормализованный уход несущей частоты составил 3×10^{-12} со стандартной девиацией 3×10^{-11} (Отчет 363). С помощью этого метода сличение частоты с погрешностью в несколько долей на 10^{10} обеспечивается менее чем за 1 минуту.

В СССР стандартные частоты передаются через стабилизированные несущие радиовещательных станций РВ-166 (Иркутск), 198 кГц с мощностью несущей 40 кВт, и РВ-76 (Новосибирск), 270 кГц, которые используют сигналы АЗЕГН (ДБП, один канал, амплитудно-модулированные с монофоническим звуком).

Излучаемые сигналы имеют частотную погрешность порядка 5×10^{-12} .

В пользу целесообразности стабилизации несущих частот вещательных станций говорит тот факт, что не наносится ущерб существующему распределению частот и использованию передатчиков по их основному назначению. Кроме того, эти станции имеют достаточно большую интенсивность поля, которая обеспечивает хорошее отношение сигнал/шум.

ОТЧЕТ 577-3

**ПЕРЕДАЧА СИГНАЛОВ И КОДОВ ВРЕМЕНИ МЕТОДОМ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ
АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА
В ВЕЩАТЕЛЬНЫХ ПЕРЕДАТЧИКАХ**

(Исследовательская программа 4В/7)

(1974—1978—1982—1990)

Передача сигналов времени с точностью, отвечающей требованиям многих пользователей, может быть обеспечена без увеличения перегруженности в полосах частот, распределенных для передач стандартных частот и сигналов времени, за счет использования существующих передатчиков, разработанных для других служб. В частности, возможно наложение фазовой модуляции, непрерывно передающей маркеры секунды и данные о времени (минута, час, день, месяц, год) в кодированной форме, на обычную амплитудную модуляцию звуковещательной станции.

Соответствующий приемник может работать как дистанционно управляемый индикатор времени, точность которого зависит только от точности передаваемой шкалы времени.

В настоящее время этот метод используется во Франции; звуковещательный передатчик модулируется в диапазоне 5 (французский международный передатчик Аллуи на 162 кГц с мощностью 2 МВт).

Кодированные данные о дате передаются «медленным кодом» со скоростью 1 бит/с; полный период составляет 1 мин.

Код DCF77 используется с некоторыми характерными особенностями (см. Отчет 578 и примечание (2) к таблице II Отчета 267).

Модель фазовой модуляции для сигналов времени приводится ниже:

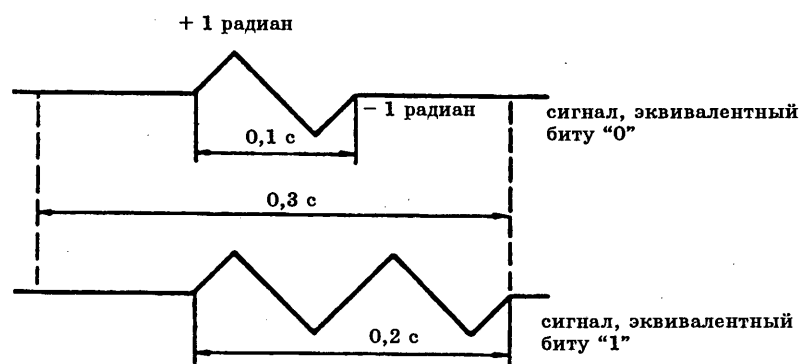


РИСУНОК 1

За исключением 0,3 с, используемых для модуляции кода времени каждую секунду, фаза также может быть модулирована для передачи другой информации.

Последняя секунда каждой минуты свободна от фазовой модуляции и используется как минутный маркер системы отсчета.

Полученный сигнал времени (на территории Франции) имеет точность 1 мс и стандартную девиацию около 0,2 мс.

В Соединенном Королевстве коды времени модулированы по фазе на частоте несущей 198 кГц передатчиков Радио BBC 4 [Wright, 1984] в каналах данных, которые созданы для удовлетворения нужд британской электротехнической промышленности и других потенциальных пользователей. Скорость данных в этом случае равна 25 бит/с; передача данных разделена на 50-битовые блоки, каждый из которых длится 2 с. Блок, непосредственно предшествующий маркеру минуты, резервируется для передачи кода времени, указывающего номер недели, номер дня, час (в UTC), минуту и сдвиг местного времени относительно UTC. Переход к следующему блоку происходит за минуту. Код текущего времени и шкала времени формируются с помощью рубидиевого стандарта, работающего в системе UTC(NPL).

Отражая широкое использование частоты 198 кГц в качестве эталона частоты, данные кодируются бифазным кодом (Манчестер). Этот код не имеет постоянной составляющей, что обеспечивает отсутствие сдвига фазы несущей. На рис. 2 дана картина фазовых отклонений от среднего значения на $\pm 22,5^\circ$ при передаче последовательности данных и показано результирующее спектральное распределение после соответствующих формирующих фильтров, при этом основная энергия находится в области скорости передачи битов. Этот код времени передается всеми тремя станциями Радио BBC 4 на частоте 198 кГц. Излучаемые сигналы синхронизованы таким образом, что в равносигнальных зонах они поступают с разницей во времени, меньшей чем 1 мс, и обеспечивают декодирование практически без погрешностей.

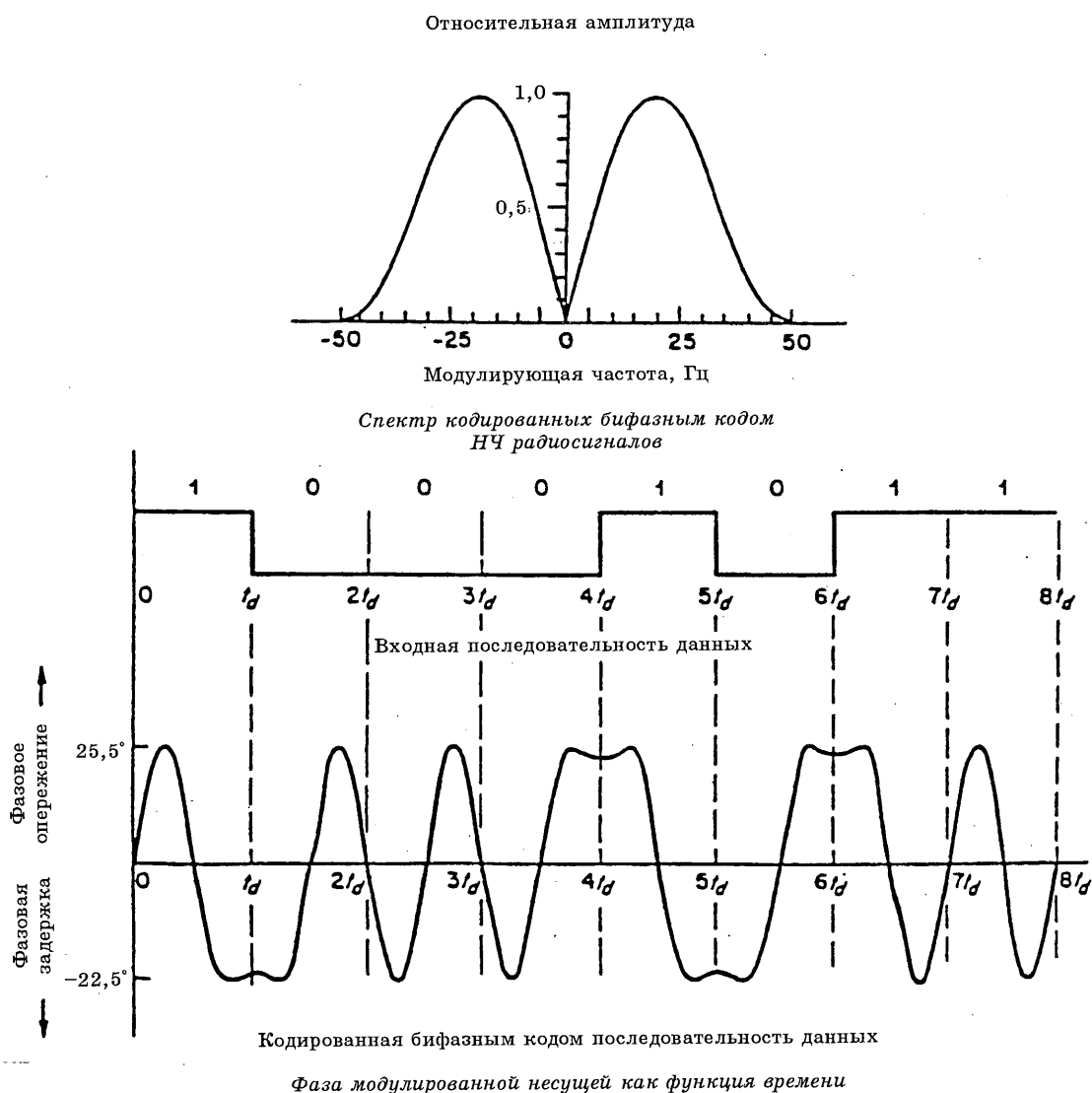


РИСУНОК 2

ССЫЛКИ

WRIGHT, D.T. [December 1984] LF radio data: specification of BBC phase-modulated transmissions on long-wave. BBC Research Department. Report No. 1984/19.

ЛИТЕРАТУРА

DUBOIS, B. [1986] «France Inter» — l'émetteur français de fréquence étalon et de signaux de temps codé. *Onde Electrique*, Vol. 66, 4—5, 111—120.

GABRY, A. [16—20 September 1974] Diffusion de fréquences étalon et de signaux horaire a partir d'émetteurs de radiodiffusion à modulation d'amplitude. IX^e Congrès International de Chronométrie, Stuttgart, Federal Republic of Germany.

GABRY, A. [1980] Diffusion de l'heure par codage de la phase d'un émetteur de radiodiffusion à modulation d'amplitude. *Onde Electrique*, Vol. 60, 10, 51—54.

ОТЧЕТ 578-3

КОДЫ ВРЕМЕНИ

(Вопрос 7/7)

(1974—1978—1982—1990)

В последние годы технический прогресс выявил необходимость передачи более полных данных о времени, чем это обеспечивают обычные секундные и минутные сигналы в рамках службы стандартных частот и сигналов времени. Потребности в более полных кодированных данных времени, которые могут включать минуту, час и день года, возникают в различных областях, например, в обеспечении общей временной базы для географически разнесенных систем мониторинга, использующих автоматическое оборудование. Ожидается рост областей применения временной информации в науке, промышленности и управлении; в связи с этим предполагается передавать информацию о времени вместе с календарной справкой в рамках систем радиоданных (RDS) в общих вещательных службах (см. Отчет 1062).

В Соединенном Королевстве Британская радиовещательная корпорация (BBC) управляет 4 государственными ОВЧ радиослужбами и сетью местных радиостанций. На первом этапе внедрения RDS в Соединенном Королевстве в октябре 1987 года была введена в эксплуатацию часть полной системы, охватывающая передатчики в Англии и обеспечивающая передачи текущего часового времени и даты [Shute, 1987]. Реализация системы осуществляется в виде двоично-кодированных передач информации о времени и датах на базе UTC (всемирное координированное время). При этом предусмотрена возможность введения сдвигов, что позволяет RDS приемнику указывать соответствующее местное время. Группа данных, содержащих часовое время (СТ), излучается один раз в минуту, следуя практике, уже применявшейся для подобного кода при работе передатчика на частоте 198 кГц в передачах службы Радио BBC 4.

В каждом из 48 кодирующих пунктов используется время RDS от часов, поверенных по принятому сигналу MSF 60 кГц, который, в свою очередь, основывается на UTC (NPL). Таким образом, в Англии в настоящее время существует согласованная служба времени и кодов времени, которая на втором этапе в 1988—1989 годах будет постепенно распространяться на другие регионы Соединенного Королевства [Marks, 1988].

Благодаря объединенным усилиям различных групп пользователей в США была стандартизована и принята серия кодов времени. Эти коды получили известность как серийный десятичный (SD) и двоично-десятичный (BCD) коды времени [IRIG, 1987, 1989].

Параллельный групповой двоичный код времени, как следует из названия, состоит из групп двоичных чисел, каждое из которых обозначает единицу времени. Формат группы двоичных чисел (предпочтительна одинарная группа) используется не только для определения размера единицы времени в системе СИ, но и для ряда других прецизионных временных измерений. Код PB5, который показан на рис. 1, иллюстрирует эту концепцию.

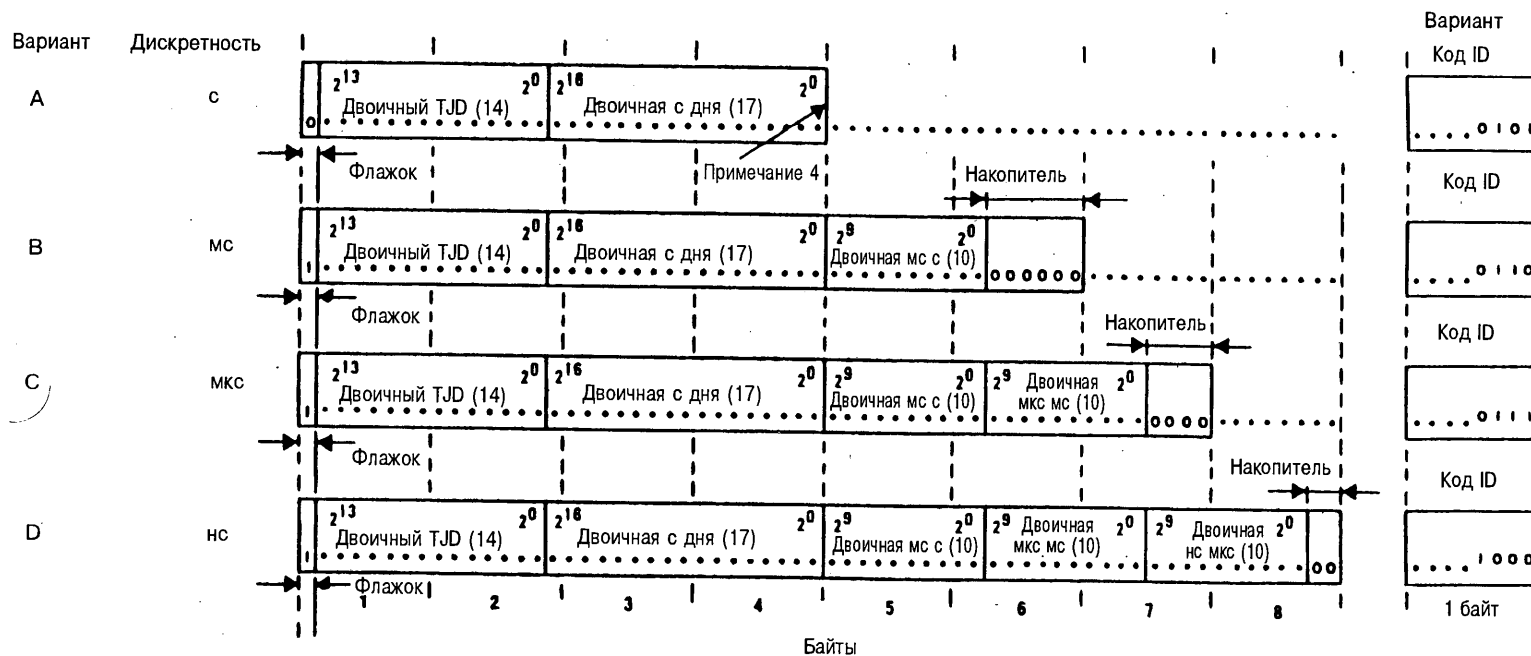


РИСУНОК 1 — Параллельный групповой двоичный код времени РВ5 и варианты дискретности

Примечание 1. — Точки изображают позиции битов.

Примечание 2. — Цифра в круглых скобках указывает биты в каждой группе.

Примечание 3. — Накопленные биты могут быть добавлены к наименьшей субсекундной группе в вариантах В, С или D, как это показано, чтобы сохранить целостность границ байта.

Примечание 4. — Группы сокращенного юлианского дня (ТJD) и секунды дня расположены справа от этой границы, а остальные группы — слева.

ТJD = MJD - 40 000 (см. Рекомендацию 457).

На рис. 2 представлен типичный двоично-десятичный код времени, который состоит из выделенного интервала времени, включающего последовательность прямоугольных импульсов или сигналов. Последовательность импульсов расположена в выделенном интервале времени так, что их позиции используются для обозначения единицы времени. В каждой единице времени или субинтервале группа из 4 импульсов используется для пересчета. Для обозначения двоичного состояния используется длительность каждого сигнала. 4 сигналам в субинтервале времени присваивается двоичный вес 1, 2, 4 и 8 для кодирования цифры от 0 до 9. Каждый субинтервал времени отделен от другого маркером субинтервала времени; каждый основной выделенный интервал времени отделен от другого маркером интервала времени в конце данного выделенного интервала времени.

Станция стандартных частот и сигналов времени WWV в 1960 году первой включила полные кодированные данные о времени в свои программы модуляции. Позднее коды времени были распространены на передачи станций WWVH и WWVB (60 кГц). На высокочастотных (ВЧ) станциях коды времени передаются на поднесущей 100 Гц. Для WWVB уровень несущей снижен на 10 дБ для каждой двоичной цифры.

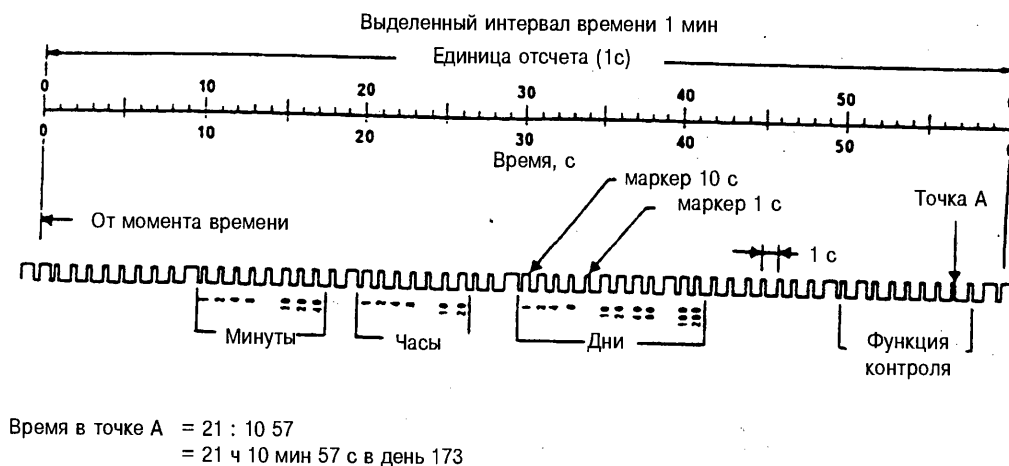


РИСУНОК 2 — Типичный формат двоично-десятичного кода времени

Учитывая новую спутниковую технику передачи времени и потребности во временных данных аппаратуры на борту спутников, космических станций, космических кораблей многоразового использования и космических зондов, а также наземной аппаратуры, космические агентства — члены CCSDS (Консультативный комитет по космическим системам данных) рекомендовали использовать двоичные коды времени, как это определено в Документе CCSDS 301-0-B-1 (январь 1987 г.).

Рекомендованы три кода:

- Несегментированный код времени CCSDS (CUC);
- Суточный сегментированный код времени CCSDS (CDS);
- Календарный сегментированный код времени CCSDS (CCS).

8-битовая преамбула (Р-поле) опознает код и указывает номинальные данные источника (на 1 января 1958 0h или как определено космическим агентством), а также дискретность (секунда, миллисекунда, микросекунда, наносекунда или пикосекунда).

За этим следует двоичный код времени (Т-поле), разделенный 8- или 16-битовыми сообщениями. См. рис. 3.

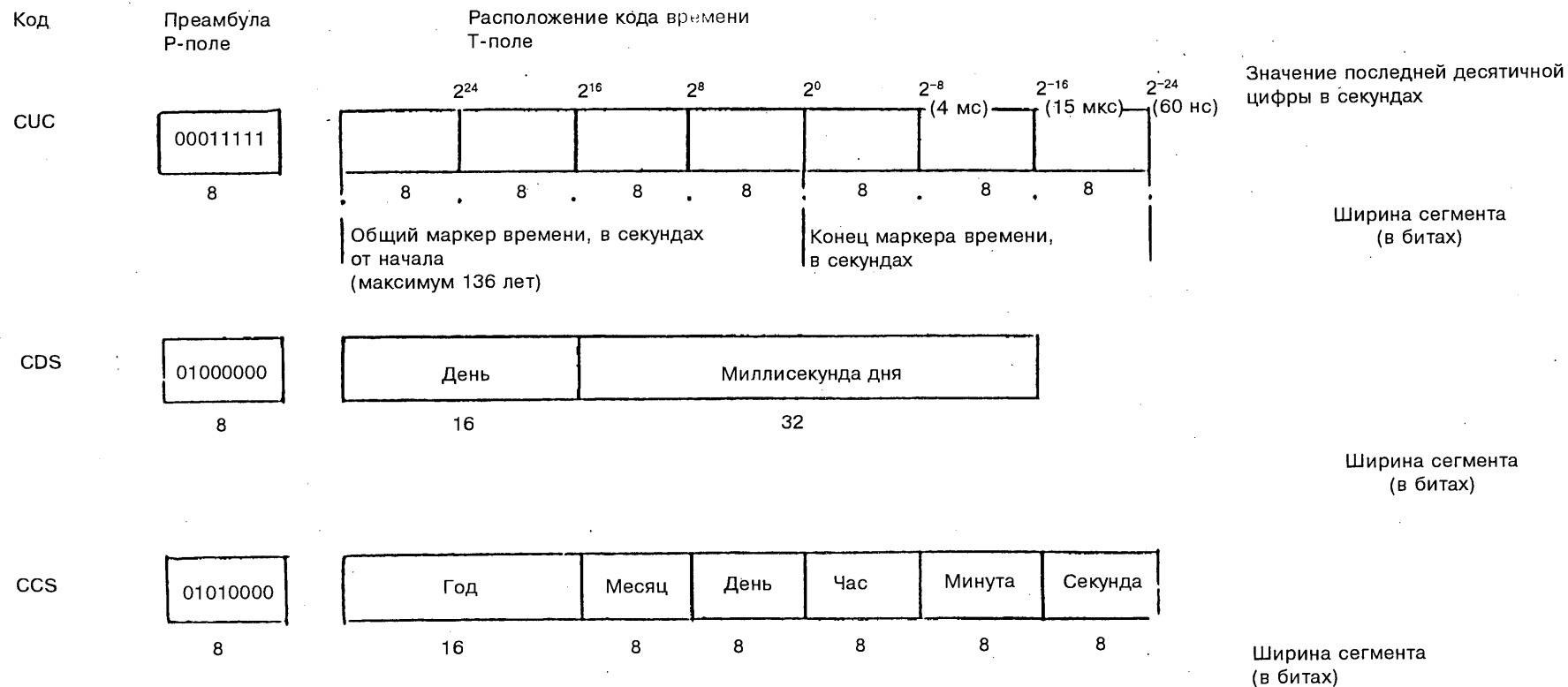


РИСУНОК 3 — Примеры кодов времени, рекомендованных CCSDS

Код времени с частотной манипуляцией (FSK код) включается в сигналы CHU с 31-й по 39-ю секунду, указывая день, час, минуту и секунду. Система FSK 300 Бд была выбрана потому, что доказала свою эффективность при передаче коммерческих данных, а также из-за пригодности для использования существующего коммерческого оборудования. В условиях сильных помех этот код продемонстрировал гораздо большую надежность по сравнению с эквивалентными амплитудно-модулированными кодами.

Начиная с DCF77 (1973 г.) [Becker и Hetzel, 1973], ряд европейских станций, передающих стандартные частоты и сигналы времени в диапазоне 5, включили в свои передачи кодированные данные времени. Были использованы два подхода, в зависимости от доступной ширины полосы частот и степени помехоустойчивости в декодере. Для обеспечения максимальной надежности был принят так называемый «медленный код» со скоростью передачи битов 1 Гц, сначала станциями DCF77, а затем — MSF 60 кГц, таким образом, полные данные передаются почти одну минуту. Этот метод кодирования обеспечивает два существенных преимущества: 1) необходимая ширина полосы частот невелика (менее 30 кГц); 2) низкая скорость передачи разрешает декодирование с использованием простых декодеров. Это особенно важно для дистанционно управляемых и автоматических станций. Приемное и декодирующее оборудование для DCF было описано [Hetzel и Rohbeck, 1974], а для MSF 60 кГц — [Cross, 1976].

Если в передатчике допустима большая ширина полосы частот, может быть применен так называемый «быстрый код», обеспечивающий передачу полной информации примерно за 0,5 с. Подобный быстрый код используется MSF 60 кГц и OMA 50 кГц. В Италии через амплитудно-модулированные и частотно-модулированные сети RAT передает аналогичный быстрый код 25 раз в сутки [Leschiutta и Pettiti, 1979]. Используемые форматы кодов, как правило, могут включать данные о секундах, минутах, часе, календарных сутках, дне недели, месяце, годе, измененном юлианском дне, а в некоторых случаях DUT1 и информацию об отличии переданного времени от поясного. Простой код для различения часа используется в вещательных станциях СССР. Он заключается в последовательном удлинении шестого сигнала стандартных сигналов времени.

Общим для служб DCF77, MSF 60 кГц и Аллуи 162 кГц является то, что все они используют двоично-десятичные коды и имеют одинаковую ширину модуляции для представления двоичных нулей (маркеры 0,1 с) и двоичных единиц (маркеры 0,2 с). Но не все коды и виды модуляции являются идентичными: для DCF77 и MSF 60 кГц используется амплитудная модуляция, а фазовая модуляция — для передатчиков Аллуи на 162 кГц и Радио BBC 4 на 198 кГц (см. Отчет 577). Используемые DCF77 и Аллуи 162 кГц коды с 15-й по 59-ю секунду аналогичны, в частности, коды 17-й и 18-й секунд указывают, является ли переданное время UTC или UTC плюс 1, 2 или 3 часа [Becker и Hetzel, 1981]. Дополнительная информация, излучаемая передатчиком Аллуи на несущей 162 кГц, касается характера дня: код 14-й секунды указывает, является ли он общенародным праздником, а код 13-й секунды указывает, является ли он кануном общенародного праздника. Кроме того, дается информация о возможных поправках UTC; это показывается кодом 1-й и 2-й секунд в течение часа, предшествующего поправке. Наконец, код 3—6-й секунд показывает число битов «1» (контрольная сумма), передаваемых в минуту [Dubouis, 1986].

ССЫЛКИ

- BECKER. G. and HETZEL P. [1973] Kodierte Zeitinformation über den Zeitmarken- und Normalfrequenzsender DCF77 (Coded time information from the Standard-Frequency and Time-Signal Transmitter DCF77). *PTB-Mitt.*, Vol. 33. 163.
- BECKER. G. and HETZEL P. [June 1981] Informationen über DCF77: Status der Ausstrahlung, Zeitcode. Zonenzeitkodierung (Information on DCF77: transmission characteristics, time code, coding of the time in the time zone). *PTB-Mitt.*
- CCSDS [1987] Consultative Committee for Space Data Systems. Recommendation for time code formats. Blue Book 301-0-B-1, available at CCSDS Secretariat (NASA), Communications and Data Systems Division (Code-TS), National Aeronautics and Space Administration, Washington, DC 20546, USA.
- CROSS. A.F. [February 1976] Time-code receiver clock — 1. *Wireless World*. Vol. 82, 1482, 30—35.
- DUBOUIS, B. [1986] «France Inter» — l'émetteur français de fréquence étalon et de signaux de temps codé. *L'onde électrique*, Vol. 66, 4—5, 111—120.
- HETZEL. P. and ROHBECK [April 1974] Digitale Anzeige der vom Sender DCF77 verbreiteten amtlichen Zeit (Digital information of the official time distributed by the transmitter DCF77). *Funkschau*. Vol. 46.

IRIG [1987, 1989] Telecommunications Group Range Commander Council (RCC). Documents 200-89 and 205-87. White Sands Missile Range, New Mexico 88002, USA.

LESCHIUTTA, S. and PETTITI, V. [September 1979] Distribution of a coded standard time information via broadcasting stations (10^e Congrès International de Chronométrie, Genève).

MARKS, B. [1988] Radio Data System (RDS) — the planning and implementation of a new broadcast service. *IEE Colloquium Digest* No. 1988/128, 2 December 1988, 2/1—2/5.

SHUTE, S. [1987] Towards the intelligent radio: RDS—the VHF Radio Data System and its implementation in the UK. *Electronics and Wireless World*, October 1987, 1023—1026.

ОТЧЕТ 731-2

ОБЗОР ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ ПЕРЕДАЧ СТАНДАРТНЫХ ЧАСТОТ
И СИГНАЛОВ ВРЕМЕНИ

(Вопрос 1/7)

(1978—1982—1990)

1. Введение

Отчет 731-1 (1982) содержит обширную информацию о результатах проведенного в 1975 году опроса пользователей служб WWV и WWVH, находящихся в ведении Национального института стандартов и технологии (NIST) США (прежнее название — Национальное бюро стандартов), а также аналогичную информацию по службам, действующим в Соединенном Королевстве и СССР. В 1987—1988 годах был проведен другой более широкий опрос, который охватил также пользователей службы WWVB НЧ, спутниковой службы кода времени GOES и ВЧ служб. Настоящий пересмотренный Отчет включает сопоставление результатов, полученных в США в 1975 и 1987 годах относительно ВЧ служб, результаты нового опроса по НЧ и спутниковым службам NIST, а также прежние отчеты других национальных администраций.

1.1 Высокочастотные службы

В 1975 и в 1987 годах Национальный институт стандартов и технологии США (прежнее название — Национальное бюро стандартов) провел широкие опросы пользователей WWV и WWVH ВЧ служб времени и частоты. С помощью подробных анкет две службы опросили, соответственно, около 12000 и 6000 респондентов. В разработанных анкетах были учтены характеристики пользователей, сферы применения, частота использования, степень удовлетворенности потребителей различными характеристиками передач WWV и WWVH. Однако важно понять, что два разных набора ответов получены от двух разных групп пользователей. Различия обусловлены не только действительно меняющимися тенденциями в использовании служб WWV и WWVH (и ВЧ служб в целом), но и различными каналами распространения анкет при проведении опросов. Поэтому, делая выводы при сопоставлении результатов двух опросов, необходимо соблюдать определенную осторожность.

Нижеприведенная информация отражает итоговые результаты двух опросов NIST, а также соответствующие результаты опросов, проведенных в Соединенном Королевстве, СССР и Италии.

В 1977 году Главный метрологический центр службы времени и частоты СССР провел опрос путем анкетирования среди пользователей служб стандартных частот и сигналов времени для сбора информации об использовании существующими радиостанциями НЧ, СЧ и ВЧ диапазонов и о требованиях пользователей к точности, а также к техническим и информационным характеристикам сигналов.

В 1979—1980 годах в ходе одного из своих периодических опросов Национальная физическая лаборатория (NPL) провела анкетирование пользователей служб MSF с особой ссылкой на ВЧ передачи. В тот же период подобный опрос был проведен в Италии для изучения потребностей пользователей в связи с введением передачи кода времени через вещательные станции.

1.2 Характеристики пользователей и областей применения

Участников опросов NIST 1975 и 1987 годов попросили указать одну или более категорий пользователей и одну или более областей применения, к которым они себя относят. Итоговые результаты каждого опроса показаны на рис. 1—4. Хотя в рамках более раннего опроса было получено вдвое больше ответов, данные для каждой категории даны как процент от общего числа полученных ответов, так что сравнение может быть сделано за разделяющий эти опросы 12-летний период. Полагают, что разница между общим числом ответов, полученных в каждом из двух опросов (12000 в 1975 году и 6000 в 1987 году), отражает различия в каналах, по которым распространялись анкеты, а не фактические значительные изменения в числе пользователей WWV и WWVH. В более раннем опросе об анкете объявлялось и/или она печаталась в гораздо большем числе изданий, чем в 1987 году, что и вызвало гораздо большее число ответов. В обоих случаях издания, которые опубликовали анкеты и привлекли к участию в них своих читателей, по-видимому, относились к числу изданий, представляющих интерес для радиолюбителей, что, в свою очередь, помогло получить относительно большое число ответов в категориях, относящихся к радиолюбителям.

Более детальный анализ результатов показывает, что категория пользователей «другие» в 1975 году в значительной степени состояла из операторов-радиолюбителей, поскольку в анкете не была указана категория «радиолюбитель». Этот результат вкупе с результатами анализа более четко сформулированных категорий «области применения» (1975 г.) и «пользователь» (1987 г.) подтвердил, что группа радиолюбителей является самой многочисленной среди групп пользователей служб WWV и WWVH. Другие значительные группы пользователей, по результатам обоих опросов, включают моряков; системы связи, в том числе радио и телевидение; поверочные лаборатории; гражданские и военные органы управления; авиацию/космос; высшее образование; производство аппаратуры и мониторинг научных данных. Хотя категории пользователей, включенные в анкеты 1975 и 1987 годов, несколько отличались друг от друга, оказалось, что «типичный» пользователь служб WWV и WWVH не изменился за прошедший период.

Результаты анализа категории «области применения», приведенные на рис. 3 и 4, подтверждают важность этих служб для операторов-радиолюбителей и говорят о том, что наиболее распространенной областью применения подобных ВЧ служб является «регулирование часов». Интересно отметить, что более 10% участников опроса 1987 года указало «базу времени для компьютеров» как важную область применения. На основе этих результатов и с учетом другой независимой информации в марте 1988 года NIST создал новую автоматизированную компьютерную службу времени, которая через автоматизированные телефонные линии обеспечивает временным кодом ASCII компьютеры и другие автоматизированные системы, для которых необходима синхронизация.

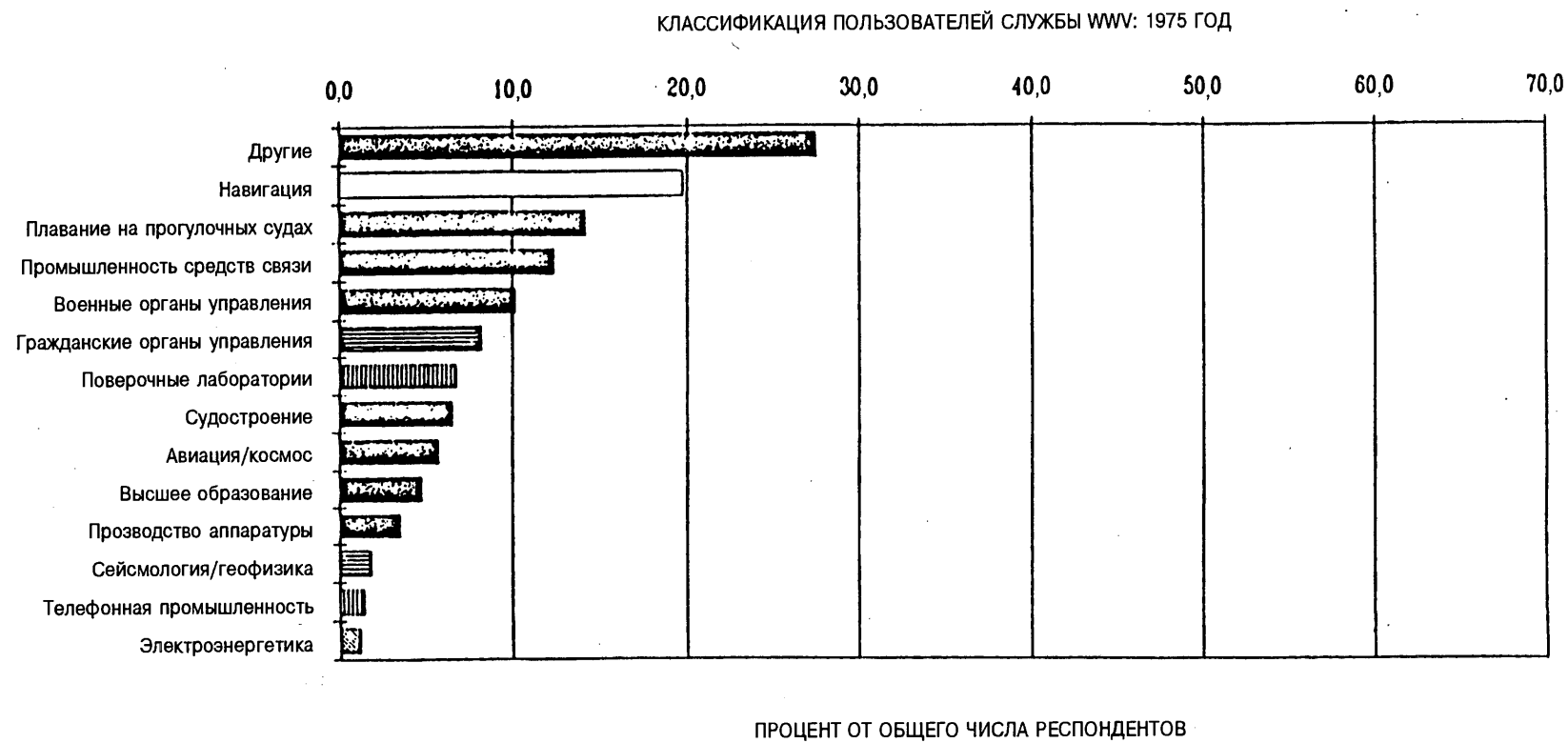


РИСУНОК 1

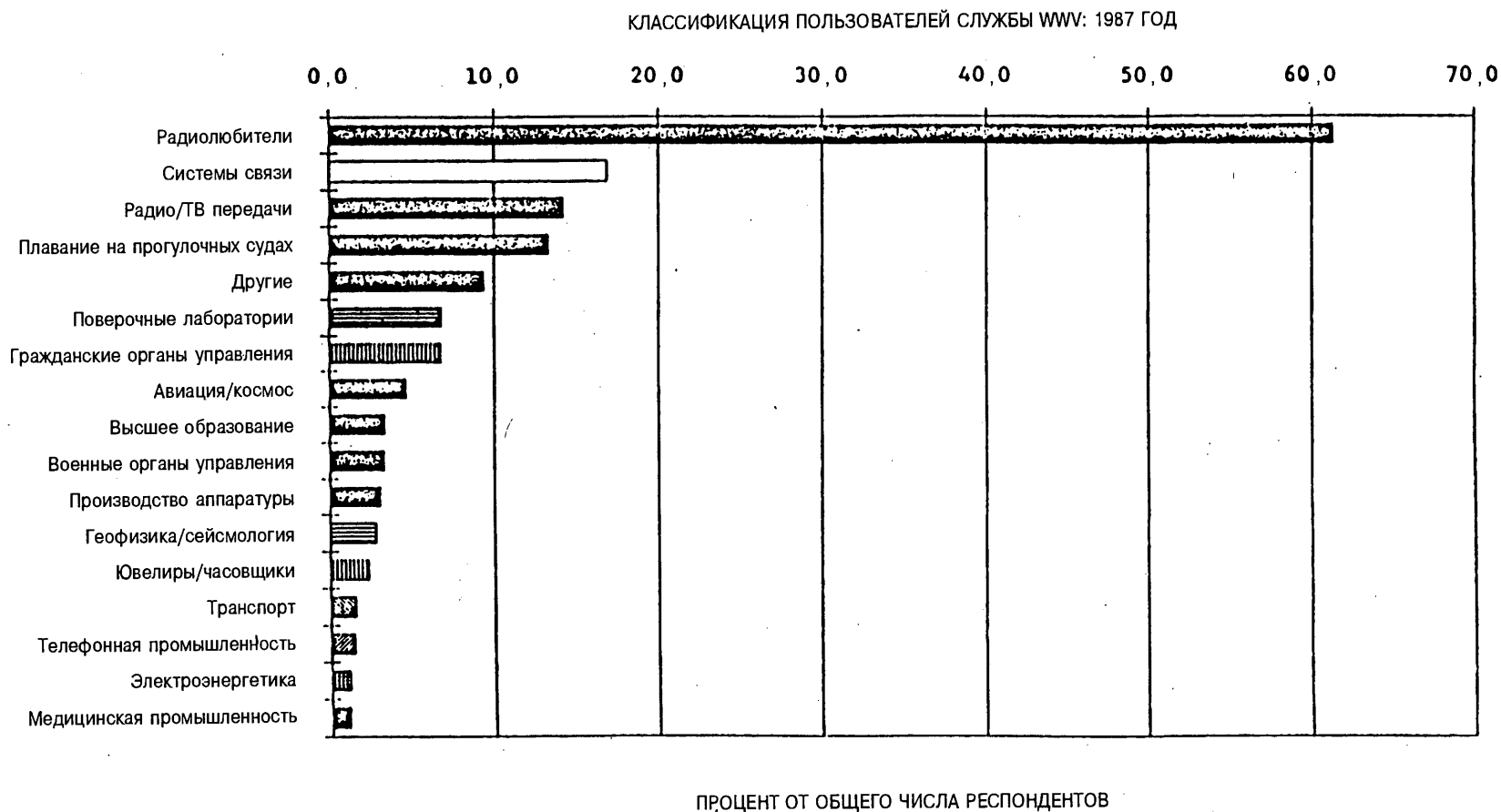


РИСУНОК 2

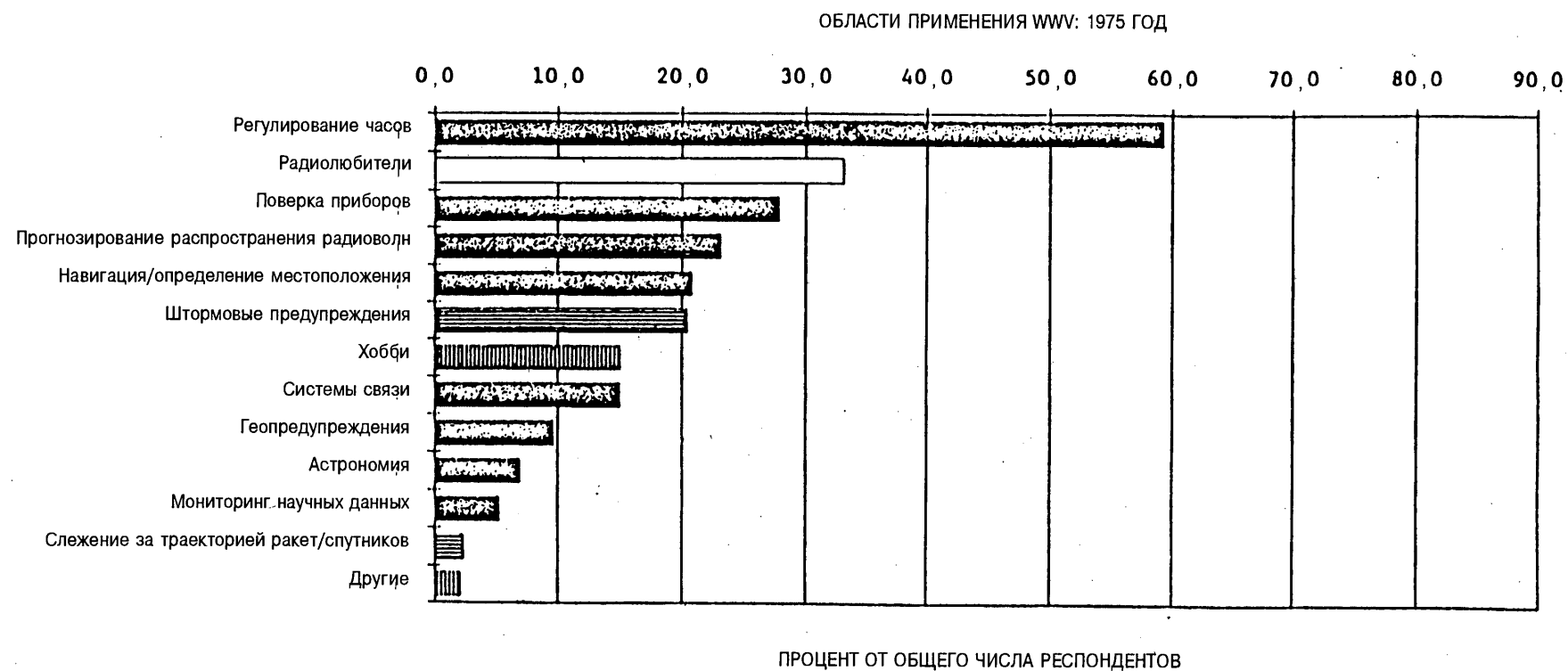


РИСУНОК 3

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ WWW: 1987 ГОД

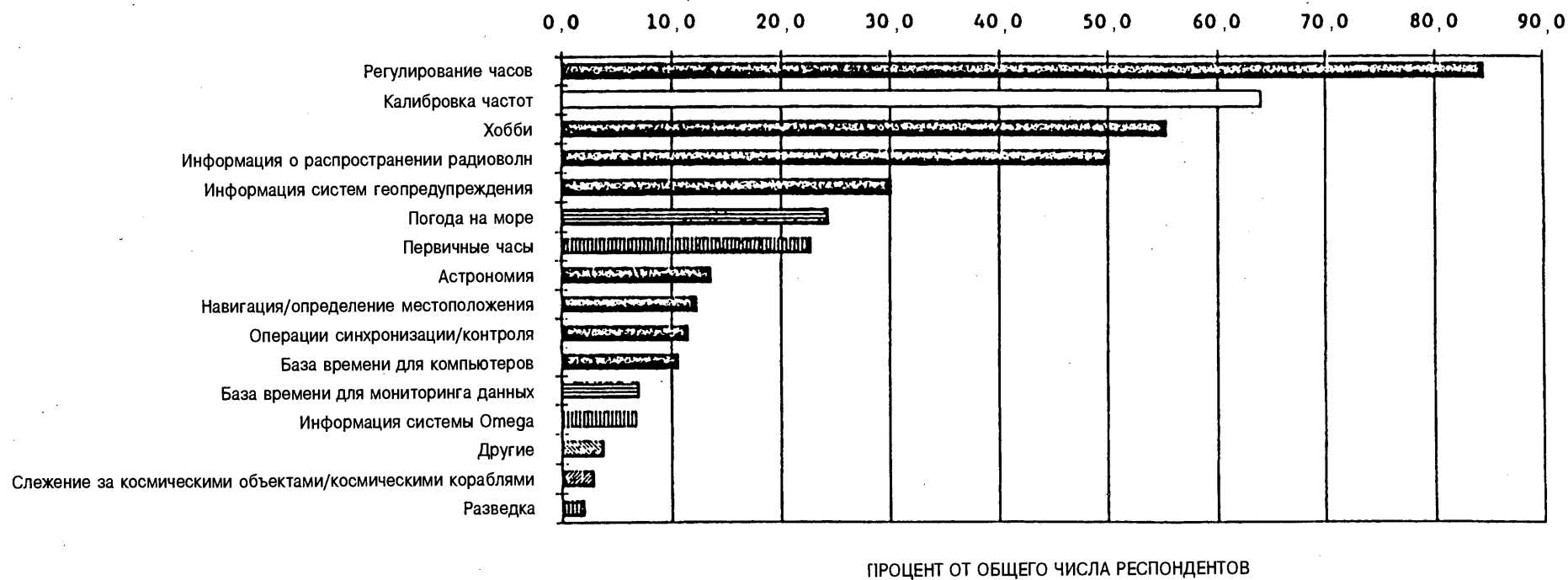


РИСУНОК 4

1.3 Относительный коэффициент использования различных ВЧ частот

На рис. 5 сравниваются результаты опросов пользователей службы WWV в 1975 и 1987 годах относительно того, какие из передаваемых частот используются наиболее широко. Для частоты 25 МГц результаты даны только за 1975 год, так как вскоре после опроса передачи WWV на этой частоте были прекращены. Шкала на оси «относительный коэффициент использования» интерпретируется следующим образом: «0» — не используется никогда; «1» — используется редко; «2» — используется иногда; «3» — используется часто. Каждый графически изображенный результат является средневзвешенным значением всех ответов для этой конкретной частоты.

Частоты 5, 10 и 15 МГц по-прежнему используются наиболее часто. Мощность передач на этих трех частотах (10 кВт) выше по сравнению с передачами на частотах 2,5 и 20 МГц (2,5 кВт). Для каждой из вышеупомянутых пяти частот коэффициент среднего использования в 1987 году был ниже, чем в 1975 году.

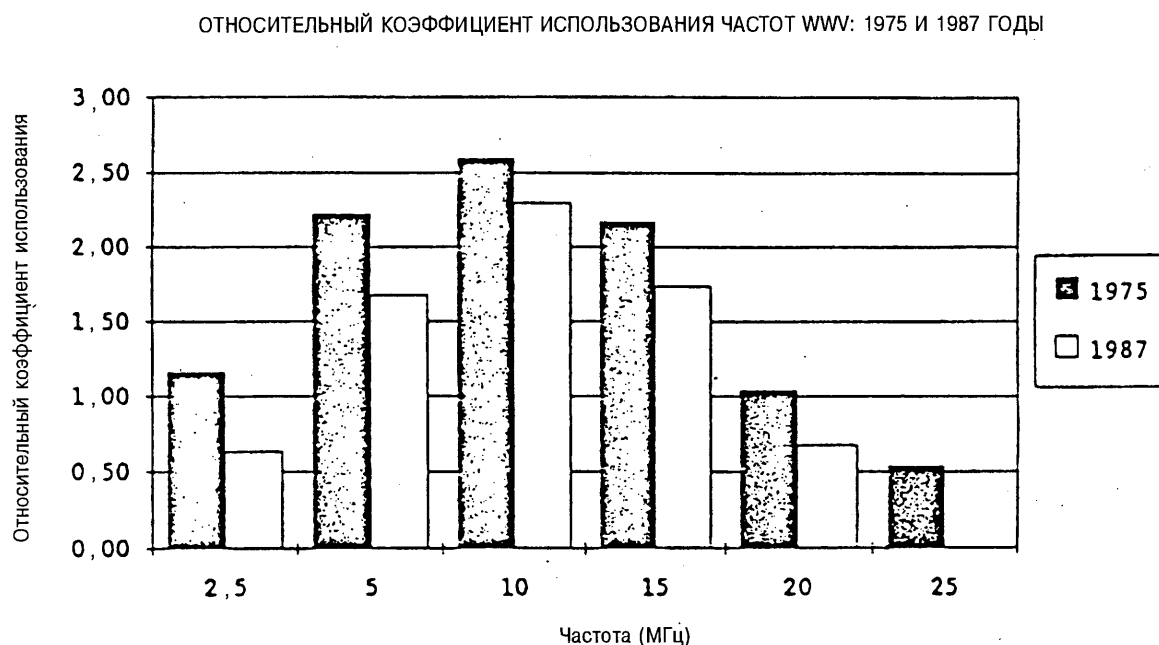


РИСУНОК 5

На рис. 6 показан относительный коэффициент использования несущих частот стандартных сигналов радиостанций СССР, работающих в полосах частот 2,5, 5, 10 и 15 МГц. Около 70% пользователей стандартных сигналов принимают сигналы со сдвигом несущей частоты примерно на ± 4 кГц от стандартного значения.

Аналогичный опрос, проведенный в Соединенном Королевстве, свидетельствует о том, что только 21% респондентов сколько-нибудь используют данные ВЧ службы. Причина заключается в том, что на территории Соединенного Королевства существуют множество альтернативных источников эталонных сигналов времени/частоты, излучаемых либо другими ВЧ станциями, либо несколькими НЧ вещательными станциями, например, MSF на 60 кГц, DCF77 и HBG. Результаты этого самого последнего опроса показали, что в пределах Соединенного Королевства и прилегающего водного пространства MSF ВЧ служба играла второстепенную роль в распространении сигналов времени и эталонной частоты, поэтому эти передачи были прекращены. Основная нагрузка возложена на передачи MSF 60 кГц, с помощью которых обеспечивается большая точность и надежность и меньшая зависимость от эффектов распространения, а также передаются коды времени, разработанные для автоматической индикации даты и времени.

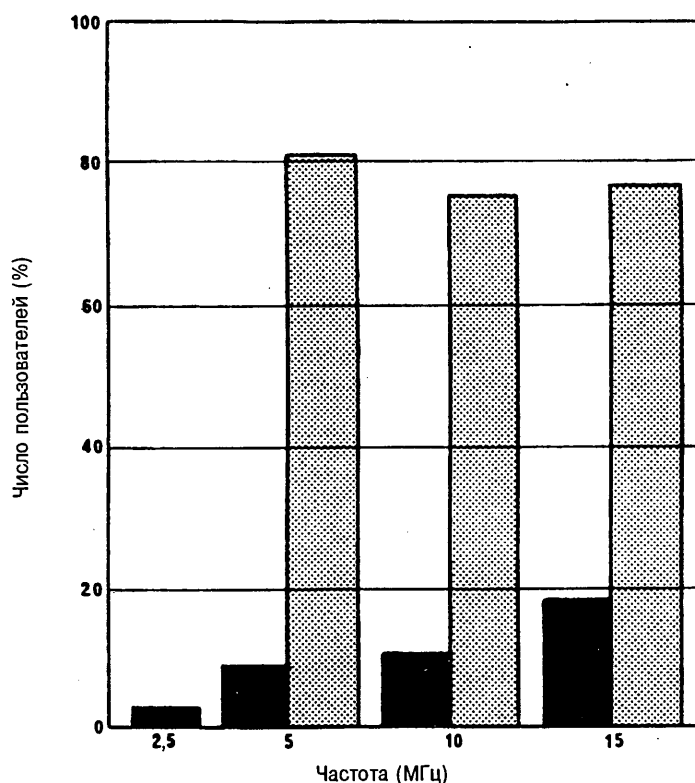


РИСУНОК 6 — Использование частот в соответствии с опросом, проведенным в СССР

(Список передатчиков СССР приведен в Отчете 267, таблица I)

± 4 кГц

± 0 кГц

1.4 Относительная значимость видов передаваемой информации

WWV и WWVH передачи включают следующие виды информации: речевое объявление времени суток (один раз в минуту), двоично-десятичный (BCD) код времени на поднесущей 100 Гц, 1-секундные «метки» для получения точных интервалов времени, стандартные частоты, поправки DUT1, сводки погоды на море, статусные данные по навигационной системе Omega (только после 1975 года) и геопредупреждения (только WWV). Кроме того, после опроса 1975 года в передачи WWV была включена информация о характеристиках распространения радиоволн. Эта информация сейчас частично включена в объявления геопредупреждений. На рис. 7 представлены итоги опросов 1975 и 1987 годов, учитывающие относительную значимость для пользователя различных видов информации, передаваемой ВЧ службами NIST.

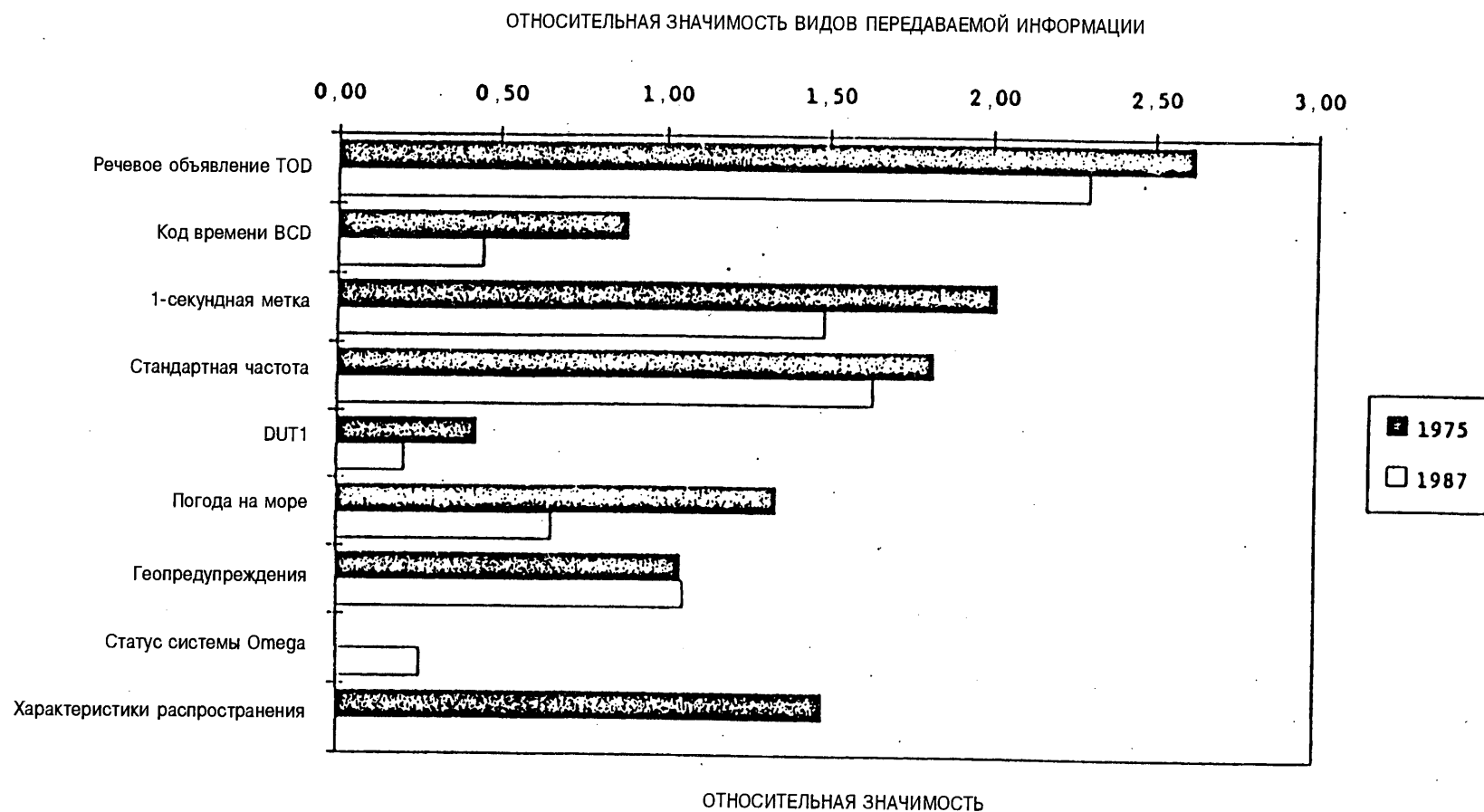


РИСУНОК 7

Результаты графически показаны на шкале «относительная значимость», где цифрам присвоены следующие значения: «0» — не важно; «1» — важно незначительно; «2» — важно; «3» — очень важно. Каждое указанное значение является средневзвешенным значением всех ответов для каждого конкретного вида передаваемой информации. Наиболее важными аспектами этих служб по-прежнему являются речевые объявления времени суток, 1-секундная метка и стандартные частоты (в том порядке, в каком они указаны), а наименее важными — поправки DUT1 и статусные данные системы Omega. Интересно отметить, что, хотя участники опроса в среднем определили код времени BCD только как «незначительно важный», более 50 миллионов постоянных жителей США обслуживаются телефонными службами точного времени, которые поддерживают точность за счет приема кода времени BCD в составе сигналов WWV. Создается впечатление, что пользователи в 1987 году рассматривали каждый из видов информации (за исключением гео-предупреждений) как менее важный, чем пользователи в 1975 году.

В СССР 75% пользователей применяют стандартную частоту и сигналы времени, излучаемые радиостанциями, для измерений частоты. НЧ сигналы наиболее популярны в этом отношении. Точность измерений, требуемая пользователями, подразделяется на три класса: низкая (погрешность измерения $\sigma > 10^{-7}$), средняя ($10^{-7} \geq \sigma > 10^{-10}$) и высокая ($\sigma \leq 10^{-10}$). Классы низкой и средней точности требуются более 90% пользователей. Около 50% пользователей стандартных сигналов применяют их для измерения времени. Степень точности, необходимая пользователям, может быть подразделена на следующие три класса: низкая ($\Delta t > 0,1$ с), средняя ($0,1 \text{ с} \geq \Delta t > 0,01$ мс) и высокая ($\Delta t \leq 10$ мкс). Подавляющему большинству всех пользователей (более 90%) необходима точность от 1с до 0,1 мс. Наиболее широко используются сигналы времени, излучаемые ВЧ радиостанциями RWM и RID. 60% всех пользователей стандартных сигналов для синхронизации шкал времени необходима шкала времени UT1, а следовательно, они используют информацию UT1 — UTC. 80% из них дополнительно используют информацию DUT1. Для получения информации о разности шкал UT1 — UTC более 90% пользователей применяют позиционный код, в то время как коду Морзе предпочтение отдают менее 10%. По этой причине с 1978 года в СССР прекращено использование кода Морзе для передачи информации UT1 — UTC.

В Италии проведенный опрос показал заметный интерес к передачам полного кода времени с одним дополнительным требованием со стороны широкого круга пользователей — включить информацию о днях недели.

1.5 *Необходимая точность, надежность и вредные помехи при приеме*

В анкеты также были включены вопросы, относящиеся к другим аспектам деятельности WWV и WWVH ВЧ служб. Несмотря на известные ограничения, присущие ВЧ службам, 89% всех пользователей в 1987 году (по сравнению с более чем 95% в 1975 году) оценили передаваемую точность как «достаточную». Около 88% пользователей службы WWV и 75% пользователей службы WWVH сообщили о «в общем приемлемом» приеме, в частности на частотах 5, 10 и 15 МГц. Аналогичные результаты были получены в ходе опроса 1975 года.

Около 35% пользователей службы WWV и 32% пользователей службы WWVH сообщили о наличии вредных помех, по крайней мере в течение какого-то времени, а около 10% пользователей — о часто возникающих проблемах помех. Цифра в 10% вполне сопоставима с результатами опроса 1975 года, таким образом шумовая обстановка явно не ухудшается.

2. Низкочастотные службы

Опрос пользователей, проведенный NIST в 1987 году, предусматривал ответы на несколько вопросов, разработанных для экспертной оценки использования и значимости службы NIST 60 кГц. Информация об анкетах и сами анкеты распространялись с помощью объявлений в технических и коммерческих изда-

ниях, рассылаемых по почте перечней NIST и перечней, издаваемых заинтересованными метрологическими организациями в сотрудничестве с производителями аппаратуры. Примерно в 900 ответах сообщалось о каком-либо использовании сигналов WWVB.

Поскольку высокий процент (около 80%) пользователей службы WWVB сообщил, что они также являются пользователями службы WWV/WWVH, очень сложно определить категории основных пользователей службы WWVB и областей применения, используя только результаты опроса. Однако, учитывая все имеющиеся данные, можно сделать вывод, что основные группы пользователей включают в себя поверочные лаборатории, радио и телевидение, мониторинг научных данных и электроэнергетику.

Формат WWVB состоит из стабилизированной несущей частоты 60 кГц, используемой для сличений фазы и частоты и полного кода времени, который содержит информацию о дате, времени суток и поправке DUT1. Около 73% респондентов рассматривают возможности для измерения частоты с помощью WWVB как «важные» или «очень важные», а 45% причисляют к одной из этих категорий передаваемый код времени.

Более 70% пользователей службы WWVB оценили точность и надежность приема как «в общем приемлемые». Около одной трети пользователей при приеме сигналов отмечают вредные помехи «иногда» или «часто».

3. Спутниковый код времени GOES

С 1974 года NIST передает спутниковый код времени с использованием системы GOES (геостационарный спутник мониторинга окружающей среды). Опрос пользователей NIST 1987 года включал несколько вопросов о таком распространении кода времени. Около 370 респондентов сообщили, что они используют код времени GOES. Из результатов опроса и других источников информации следует, что основными категориями пользователей кода GOES являются поверочные лаборатории, электроэнергетические компании, промышленность средств связи, мониторинг научных данных и различные виды деятельности правительства.

Пользователи сообщили, что точность и надежность приема сигналов GOES «приемлемы» или «в общем приемлемы» во всех случаях, за исключением приблизительно 5%. В связи с потенциальной возможностью помех между кодом времени GOES и частотными каналами некоторых сухопутных подвижных служб, использующих те же распределенные полосы частот, пользователям был задан вопрос о помеховой обстановке. Хотя 24% пользователей сообщили о вредных помехах, возникающих иногда или часто, только около 15% считают, что это существенно мешает использованию сигналов GOES. Около 42% пользователей сообщают, что используют код времени с его полной разрешающей способностью 100 мкс (за счет применения приемников с автоматической корректировкой изменений задержки распространения), а остальные 58% пользователей, по-видимому, удовлетворены разрешающей способностью примерно 1 мс, обеспечиваемой через GOES без обработки позиционной информации спутника, заложенной в формате передаваемого сигнала.

Во время маневров спутника при передаче кода времени иногда возможны погрешности, превышающие обычный уровень 100 мкс на протяжении нескольких часов, до тех пор пока от эксплуатантов спутника в NIST не поступит обновленная информация о местоположении спутника. Только около 12% пользователей сочли эти превышающие обычный уровень отклонения кода времени серьезной проблемой.

ЛИТЕРАТУРА

ЧЕРЕНКОВ Г.Т. [1978] Использование в народном хозяйстве эталонных сигналов частоты и времени, передаваемых через радиостанции ГСВЧ СССР. Всесоюзный научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений. Исследования в области измерений времени и частоты, т. 37, 67, 15.

NBS [1975] US National Bureau of Standards. Technical Note 674.

NIST [1989] (готовится к изданию).

Документы МККР

[1978—82]: 7/111 (Соединенное Королевство); 7/130 (Италия).

ОТЧЕТ 732-3

**ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО СНИЖЕНИЮ ВЗАИМНЫХ ПОМЕХ МЕЖДУ ИЗЛУЧЕНИЯМИ
СТАНДАРТНЫХ ЧАСТОТ И СИГНАЛОВ ВРЕМЕНИ В ДИАПАЗОНАХ 6 И 7**

(Исследовательская программа 1A/7)

(1978—1982—1986—1990)

1. Действующие методики

Настоящий Отчет частично основан на выводах Временной рабочей группы 7/3, учрежденной для рассмотрения способов снижения взаимных помех в службах стандартных частот и сигналов времени. В нем обсуждаются следующие различные методы, призванные помочь в решении проблем взаимных помех.

1.1 Временное разделение (временное уплотнение каналов)

Этот метод используется на практике для частичного снижения взаимных помех. Он не требует изменений в приемных устройствах, кроме знания программ передач, если необходима корректировка задержки распространения. В идеальном случае временное разделение можно было бы применять во всемирном масштабе с использованием временного уплотнения передач, ведущихся совместно. Подобная система была задумана 20 лет назад Председателем 7-й Исследовательской комиссии как средство устранения взаимных помех между WWV, тогда осуществлявшим передачи из Белтсвилла (Мэриленд), и различными европейскими передатчиками стандартной частоты и сигналов времени (SFTS).

Временное разделение продолжает использоваться в небольшой с географической точки зрения зоне Западной Европы; оно используется для передач IAM, IBF и OMA (только модуляция) на 2,5 МГц. Несмотря на признание целесообразности подобных локальных применений, данная методика вовсе не рассматривается как основной способ решения существующих проблем. Из-за суточных и сезонных изменений в условиях распространения сигналов нельзя гарантировать непрерывность приема на какой-либо одной частоте, что может рассматриваться некоторыми пользователями как серьезный недостаток данной системы. Еще одна проблема состоит в том, что время доступа к желаемой передаче увеличено, поэтому могут возникнуть сложности в опознавании сигналов различных станций.

Может быть предусмотрен альтернативный вариант временного уплотнения каналов, основанный на использовании более короткого периода чередования, при котором, например, каждой из шести потенциально создающих помехи станций в каждой минуте выделяются последовательные 10-секундные сегменты для работы только этой станции без помех от других пяти. Конечно, подобная система требует координации между задействованными станциями, но этого несложно достичь, поскольку все станции строго придерживаются UTC в пределах 1 мс.

Была также рассмотрена расширенная концепция временного разделения, согласно которой две потенциально создающие помехи станции могли бы передавать несущую частоту непрерывно, но с подавлением, соответственно, четных и нечетных импульсов, в результате чего обеспечивается чередование сигналов времени. Однако для обеспечения эффективности такой способ требует особых условий непрерывности и стабильности распространения сигналов.

Альтернативная форма временного разделения заключается в соответствующем эквивалентном сдвиге передач секундных сигналов; подобную процедуру в отношении сигналов UTC использует станция ВРМ в Китайской Народной Республике.

1.2 Тональная модуляция звуковой частотой

Эта форма модуляции, за исключением ограниченного числа случаев, когда она необходима для идентификации станций, является неэкономной с точки зрения использования ценной спектральной полосы, поэтому ближайшая цель состоит в том, чтобы практически прекратить использование такой модуляции в службе SFTS.

1.3 Частотное разделение

1.3.1 Поднесущие частоты сигнала

В настоящее время большинство станций в диапазонах 6 и 7 используют излучение класса A2X для передачи сигналов времени. Такие станции, как WWV, WWVH, JJY и другие, передают маркеры секунды на разделенных поднесущих частотах, выбранных в соответствии с формулой:

$$f_{sc}(n) = 0,2n \quad \text{кГц}, \quad (1)$$

где n является целым числом; выбрано, что $n = 5$ для WWV, $n = 6$ для WWVH и $n = 8$ для JJY.

Использование излучения A2X для передачи сигналов времени относительно упрощает разделение потенциальных мешающих сигналов на одной и той же несущей частоте с помощью соответствующих фильтров звуковых частот, хотя и за счет увеличения времени задержки в приемнике.

1.3.2 Однополосная (ОБП) работа с полной несущей

Преимущества однополосной работы очевидны с точки зрения уменьшения влияния помех при экономии спектра и обеспечении защиты от замираний. В то же время ясно, что администрации могут не пожелать вкладывать необходимые денежные средства в существующие передающие станции, чтобы перейти на однополосную работу, когда для службы SFTS в диапазонах 6 и 7 может быть предусмотрен ограниченный срок, скажем, 15—20 лет.

Подобные соображения учитываются при введении более уникальных систем фазовой или частотной модуляции, которые могут обеспечить совместную работу нескольких станций с небольшими взаимными помехами, но только за счет дополнительного усовершенствования как передатчиков, так и приемников. Чтобы стать приемлемыми, все модификации существующих сетей станций SFTS должны быть просты в исполнении и требовать внесения лишь незначительных изменений в существующее оборудование для передач и приема либо вообще не требовать изменений.

1.3.3 Однополосная работа со сдвигом полной и/или подавленной несущей

Метод считается перспективным для совместных, как уже ведущихся, так и возможных в будущем, передач в распределенных СЧ и ВЧ полосах частот. Предполагается, что несущие частоты более не будут ограничены значениями 2,5, 5, 10, 15, 20 и 25 МГц, а могут иметь, помимо них, значения, определяемые по формуле:

$$f(N) = (X + 4N) \quad \text{кГц}, \quad (2)$$

где X равен 2500, 5000, 10000, 15000 и 20000, а N может принимать значения 0 или ± 1 для $2500 \leq X \leq 20000$.

Этот метод сдвига несущей успешно применяется в СССР в диапазоне частот до 15 МГц при значениях N , выбранных равными либо 0, либо ± 1 . Схема расположения станций SFTS на территории Советского Союза показана на рис. 1 с соответствующими рабочими частотами (на основе Отчета 267). Кроме того, показано расположение станций в других странах, которые работают одновременно по меньшей мере на 3 частотах (то есть ATA, BPM, LOL, WWV и WWVH) в диапазоне частот 2,5—15 МГц. Как указано в Отчете 731, советские станции RWM и RID со сдвигом +4 кГц и -4 кГц, соответственно, получили весьма широкое применение [Черенков, 1978] вследствие того, что они имеют высокую степень защиты от помех, создаваемых другими станциями SFTS, работающими в центре распределенных полос. Сигналы могут быть приняты двумя способами: как сигналы J2X путем смешения с местной несущей 5, 10 или 15 МГц с последующим линейным или нелинейным детектированием и фильтрацией или обычным способом как сигналы A1X на несущих частотах, взятых из стандартных значений.

В силу значительных преимуществ метода однополосной работы при решении проблем региональных помех следует рекомендовать рассмотреть вопрос об использовании излучений H2X (одна боковая полоса, полная несущая) и J2X (одна боковая полоса, подавленная несущая) только со стандартными несущими частотами в присвоенных полосах частот. Для упрощения приема и повышения защиты от помех верхние (f_{sc+}) и нижние (f_{sc-}) значения поднесущих могут быть выбраны следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} f_{sc+} &= 0,4 (n + 1/2) & \text{кГц} \\ f_{sc-} &= 0,4 (n + 1) & \text{кГц} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Для излучений H2X предполагаемые значения n равны 1, 2, ..., 5, а для излучений J2X $n = 6, 7, \dots, 11$; например, $n = 9$ соответствует верхнему частотному сдвигу +3,8 кГц и нижнему сдвигу -4 кГц (см. уравнение (3)).

1.3.4 Общая ширина полосы частот, требуемая для службы SFTS

Для включения модуляционных боковых полос частот в соответствии с новой системой распределения несущих частот требуется несколько увеличить общую ширину полос частот, доступную службе SFTS.

На 2,5, 5 и 10 МГц общая ширина полосы частот должна составлять ± 8 кГц для включения трех возможных передач в соответствии со значениями N , равными -1, 0 и +1. В настоящее время так называемые «защитные полосы частот» находятся на ± 5 кГц, за исключением 2,5 МГц в Районе 1, где частотные ограничения составляют только ± 2 кГц.

На 15 и 20 МГц общая ширина полосы частот должна составлять ± 12 кГц в соответствии со значениями N , равными -2, -1, 0, +1 и +2. В связи с отдаленной возможностью того, что частота 25 МГц вновь будет задействована в SFTS службе, в дальнейшем предлагается отказаться от использования этой частоты в будущей работе службы SFTS.

1.3.5 Использование новых распределенных частот

По решению Всемирной административной радиоконференции (Женева, 1979 г.) стандартные частоты и сигналы времени могут передаваться в трех полосах на частотах 4, 8 и 16 МГц в Районе 3. Это решение поможет смягчить остроту проблемы взаимных помех на других частотах в Районе 3. Станция JJY в Японии начала работать на 8 МГц.

1.4 Понятие «ближайшего соседа»

План распределения частот, описанный в предыдущих параграфах, может обеспечить большое число SFTS передач с минимальными взаимными помехами. Способы реализации этого плана и эффективность использования нескольких имеющихся частот будут зависеть от относительного географического положения станций, потенциально создающих помехи. Принято считать, что, если две станции являются «ближайшими соседями» и разнесены друг от друга на расстояние менее 3000 км, то разница между их соответствующими несущими частотами должна обязательно составлять по меньшей мере ± 4 кГц; точное расположение частоты будет зависеть также от расположения «следующего ближайшего соседа», но, по существу, это двусторонняя проблема, которая должна решаться с учетом пар ближайших станций.

В качестве примера возможная реализация предлагаемого плана распределения частот рассматривается со ссылкой на рис. 1. Относительные сдвиги частот станций на территории СССР приняты за основу, при этом указаны соответствующие значения N . Необходимые значения N для АТА, ВРМ, LOL, WWV и WWVH могут быть выбраны в соответствии с планом распределения частот для сведения к минимуму уровня взаимных помех. Однако при этом необходимо подчеркнуть, что приведенные ниже примеры ни в коем случае не предназначены для предопределения интересов администраций в вопросе выбора подходящих значений N при двусторонних и трехсторонних обсуждениях.

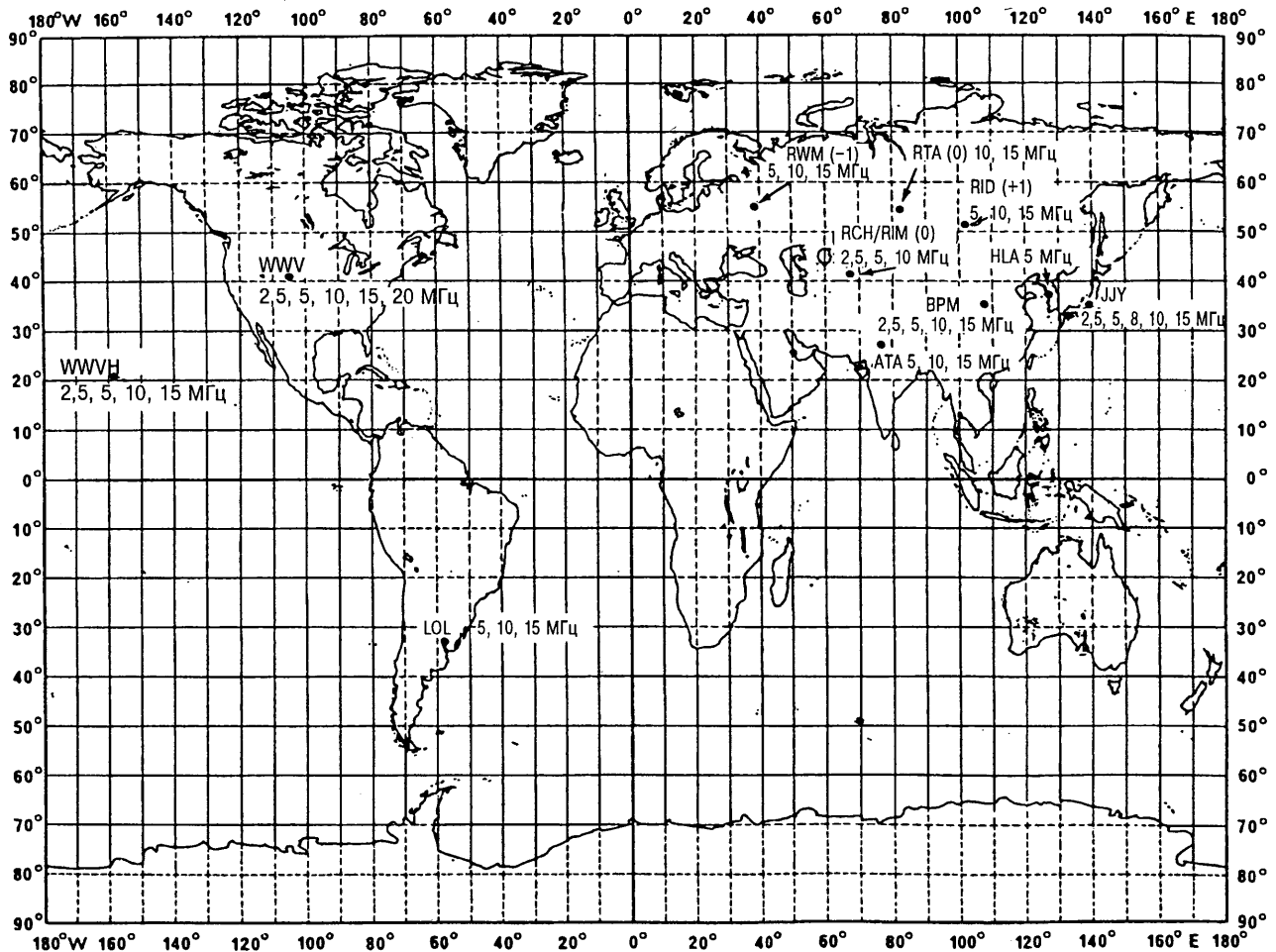


РИСУНОК 1 — Сдвиг несущих частот станций стандартных частот и сигналов времени

Если обратить внимание на западную часть Тихого океана, то сразу становится видно, что между передачами BPM, JJY и WWVH на 2, 5, 10 и 15 МГц существуют серьезные проблемы. Их остроту можно было бы значительно смягчить, если бы JJY работала при $N = -1$, принимая во внимание, что RID (Иркутск) имеет $N = +1$. Альтернативой могло бы быть принятие для WWVH $N = +1$; JJY, $N = 0$; и BPM, $N = -1$. Более основательная перестройка работы этих осуществляющих передачи как минимум на двух частотах «базовых» станций во всемирной сети была бы возможна при некотором перераспределении значений N на территории СССР. Из рис. 1 следует, что для RTA и RID взаимный обмен значениями N мог бы иметь определенные преимущества; кроме того, это соответствовало бы принципу «ближайшего соседа», где «ближайший сосед» — станция RCH/RIM (Ташкент). Вместе с тем подобный обмен позволил бы принять большую частотную разницу между BPM и JJY, которые расположены относительно близко друг к другу, при $N = -1$ для BPM и $N = +1$ для JJY. Американская станция LOL достаточно удалена от WWV и других передатчиков, что позволяет ей и далее работать при $N = 0$; в предлагаемой системе для станции LOL может быть также выбрано $N = \pm 1$.

Нужно подчеркнуть, что реализация предложенного плана распределения частот сложна и что, если даже значение N выбрано для данной станции, то его нелегко изменить, не оказав влияния на другие части сети SFTS. Тем не менее, исходя из значений частот, принятых в СССР, можно создать согласованную и совместимую сеть станций SFTS с минимальным уровнем взаимных помех и при минимально возможных изменениях в обычном использовании таких станций.

1.5 *Контроль диаграммы вертикального и горизонтального излучения*

Хотя было высказано предположение, что основным средством контроля взаимных помех может стать соответствующий выбор относительного сдвига частот, это не исключает необходимости исследовать разброс диаграммы излучения как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях от передатчика. В частности, в географически малых зонах может потребоваться ограничить вертикальную полярную диаграмму углом возвышения более 30° с преобладанием излучения под большим углом. Достаточно легко это можно обеспечить с помощью горизонтальных симметричных вибраторов; в Отчете 301 10-й Исследовательской комиссии даны характеристики подобных систем, разработанных для вещания в тропических регионах. Другая информация также содержится в Справочнике МККР по направленным антеннам [ITU, 1966].

2. **Административные меры**

2.1 Предлагается, чтобы настоящий Отчет был передан Председателю 2-й Исследовательской комиссии, поскольку распределенные для передачи стандартных частот полосы частично используются также радионавигационной службой и службой космических исследований.

2.2 Кроме того, хотя в Отчете 731 отмечена постоянная необходимость в передачах в диапазонах 6 и 7, предлагается, чтобы администрации периодически рассматривали вопрос о потребностях в таких службах с учетом желательной экономии мощности и спектра, чего можно добиться за счет сокращения этих служб.

ССЫЛКИ

ЧЕРЕНКОВ Г.Т. [1978] Использование в народном хозяйстве эталонных сигналов частоты и времени, передаваемых радиостанциями ГСВЧ СССР. Всесоюзный научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений. Исследования в области измерений времени и частоты, т. 37, 67, 15.

ITU [1966] Handbook on high-frequency directional antennas. ITU, Geneva.

ОТЧЕТ 735-1

ЗНАЧЕНИЕ ПЕРЕДАЧ СТАНДАРТНЫХ ЧАСТОТ
И СИГНАЛОВ ВРЕМЕНИ В ДИАПАЗОНЕ 5

(Исследовательская программа 2В/7)

(1978—1982)

1. В диапазоне 5 ряд станций излучают стандартные частоты и сигналы времени непрерывно; некоторые из этих станций передают код времени с полной информацией о дате, как, например, минута, час, календарный день, день недели, месяц и год.

Этот вид службы особенно хорошо представлен в Европе, где передачи в диапазоне 5, как правило, используются гораздо чаще, чем службы в полосах частот, распределенных для существующих передач стандартных частот и сигналов времени.

2. Сегмент диапазона 5 особенно хорошо подходит для распространения времени и частоты по следующим причинам:

- поверхностная волна охватывает широкую территорию и создает напряженность поля, большую, чем пространственная волна, для расстояний в несколько сот километров;
- пространственная волна распространяется через ионосферный слой D, и ее распространение стабильно, особенно в дневное время;
- к.п.д. антенны при распространении в диапазоне 5 значительно выше, чем к.п.д., которые могут быть получены в диапазоне 4, поэтому может обеспечиваться относительно большая ширина полос частот.

Как следствие этих факторов распространения и технических факторов, могут быть отмечены следующие особенности:

- при сличении частот фаза несущей частоты станции воспроизводится на приемной станции с весьма высокой точностью, например со стандартной девиацией менее 1 мкс на расстоянии 700 км в течение дня. На расстоянии 300 км от передающей станции стандартная девиация принятой фазы несущей частоты, как было установлено, составляет $< 0,2$ мкс в дневное время. Это позволяет обеспечивать большие географические зоны стандартными частотами с относительной погрешностью, меньшей чем 1×10^{-12} , если используются оптимальные процедуры усреднения. Вторичные стандарты частоты, например рубидиевые, могут поддерживаться с помощью таких передач стандартной частоты с улучшенной долговременной частотной стабильностью;
- при сличении шкал времени с использованием простого и недорогого оборудования может быть получена погрешность менее 0,1 мс в течение дня на расстоянии в несколько сот километров. При некоторой потере точности часы пользователей могут сравниваться на расстояниях до 2000 км.

3. Были установлены следующие сферы применения и классы пользователей, касающиеся передач в диапазоне 5:

3.1 Стандартная частота

Промышленные лаборатории; научные центры; сличения времени между службами времени сопредельных стран; помощь службам времени стран, не имеющих собственных современных технических средств; контроль несущей частоты передатчиков, используемых различными радиослужбами; сети электросвязи (например, синхронные или полусинхронные цифровые сети); калибровка часов и хронометров.

3.2 Сигналы времени

Бытовые часы; службы звуковых часов; повышение качества работы телевидения и радиовещания; почтовые службы; железные дороги и другие виды транспорта, включая управление воздушным движением; первичные часы для промышленных фирм и общественных учреждений.

Датирование событий: транспорт; геонаука (например, сейсмические измерения и геосейсмические исследования); медицина (для хронологии медицинских исследований).

Передаваемая радиостанциями информация может выполнять роль общего эталона времени для электронных систем обработки данных (например, процессоры) и для контроллеров операций на промышленных предприятиях.

Эталон времени для управления распределением электроэнергии, например, при повременной оплате и в исследованиях динамического воздействия на электрическую сеть.

ОТЧЕТ 736-1

**ЧАСТОТНОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ МЕЖДУ СЛУЖБОЙ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ ВРЕМЕНИ
И РАДИОЛОКАЦИОННОЙ, ФИКСИРОВАННОЙ СПУТНИКОВОЙ,
ФИКСИРОВАННОЙ И ПОДВИЖНОЙ СЛУЖБАМИ В ПОЛОСАХ ЧАСТОТ
ВБЛИЗИ 14, 21, 26 И 31 ГГц**

(Исследовательская программа 2А/7)

(1978—1982)

1. Введение

В настоящем Отчете рассматриваются проблемы частотного разделения между предлагаемой спутниковой системой передачи времени и радиолокационной, фиксированной спутниковой, фиксированной и подвижной службами в полосах частот вблизи 14, 21, 24 и 31 ГГц (см. таблицу I). Оценка сделана из расчета совместной работы на одном канале спутниковой системы передачи времени, радиолокационной системы, связанной аппаратуры фиксированной спутниковой службы, а также оборудования фиксированной и подвижной наземных радиорелейных систем. Для формулирования выводов, завершающих анализ, были приняты типовые параметры общих классов оборудования.

2. Спутниковая система передачи времени

На рис. 1 представлена схема предлагаемой спутниковой системы передачи времени, предназначенной для обеспечения высокоточных сличений времени и частоты в различных наземных пунктах, разнесенных на большие расстояния. Псевдослучайный шумовой (PRN) кодированный сигнал передается с наземного передатчика на приемное устройство на борту космического аппарата. Приемник космического аппарата декодирует переданный сигнал и производит его сличение с находящимися на борту точными часами с целью определения времени прихода сигнала, соотнесенного со стандартом времени на борту космического аппарата. Затем передатчик космического аппарата передает на наземный пункт PRN модулированный сигнал, который содержит данные об эфемеридах спутника и времени приема земного сигнала. Наземное приемное устройство декодирует этот сигнал, а затем проводит сличение между стандартом времени космического аппарата и наземными часами. С космическим аппаратом могут работать две земные станции таким образом, чтобы станции № 1 и № 2 могли сравнить свои часы. Часы на борту космического аппарата также могут сравниваться с точным стандартом времени на соответствующей земной станции с целью оценки точности этих часов. В таблице I приводятся диапазоны радиочастот, предлагаемые для использования спутниковой системой передачи времени. Рабочие характеристики приведены в таблице II. PRN кодирование применяется для обеспечения отношений сигнал/шум с минимальной мощностью помех, принимаемых другими станциями, использующими те же полосы частот.

3. Частотное разделение с радиолокационной службой

Диапазон радиочастот, предложенный для передачи времени по линии вверх на частоте около 14 ГГц, должен быть разделен с радиолокационной службой. В таблице III приведены типичные рабочие характеристики радиолокационной системы, которая могла бы работать в этой части частотного спектра. Взаимные помехи между земной станцией системы передачи времени и радиолокационной системой могут быть устранены за счет координирования местоположения обеих станций, ориентации антенн, высоты антенн и т. д. Например, если две станции разнесены на расстояние (в километрах):

$$d \leq \sqrt{17h_1} + \sqrt{17h_2},$$

где:

h_1 — высота антенны 1, м,
 h_2 — высота антенны 2, м,

то каждая из них будет находиться ниже радиогоризонта другой и не будет связи по главному лепестку, независимо от ориентации антенн. В качестве примера рассмотрим случай, когда две антенны имеют высоту мачты 15 м, тогда станции должны быть разнесены на расстояние около 32 км, чтобы каждая из них оказалась ниже радиогоризонта другой. Кроме того, направленность передающей антенны в системе передачи сигналов времени может быть использована для дальнейшего ограничения помех в антенне радиолокационной системы.

Согласно требованиям Регламента радиосвязи (пп. 2540—2548), эквивалентная изотропно излучаемая мощность (э.и.и.м.) земной станции, работающей в полосах частот между 1 и 15 ГГц, в любом направлении к горизонту не должна превышать:

+ 40 дБВт в любой полосе шириной 4 кГц при $\theta \leq 0^\circ$,

+ 40 + 3 θ дБВт в любой полосе шириной 4 кГц при $0^\circ < \theta \leq 5^\circ$,

где θ — угол места горизонта, наблюдаемый из центра излучения антенны земной станции. Этот угол измеряется в градусах и имеет положительные значения над горизонтальной плоскостью и отрицательные — под нею. Для указанной системы

$$\begin{aligned} \text{э.и.и.м.} &= P_t + G_t + B \\ &= 20 + 53 - 48 = 25 \text{ дБ(Вт/4 кГц) максимум,} \end{aligned}$$

где:

P_t — передаваемая мощность, дБВт,

G_t — усиление передающей антенны, дБ,

B — поправочный коэффициент расширения полосы частот.

$$10 \log \left(\frac{4 \times 10^3}{250 \times 10^6} \right)$$

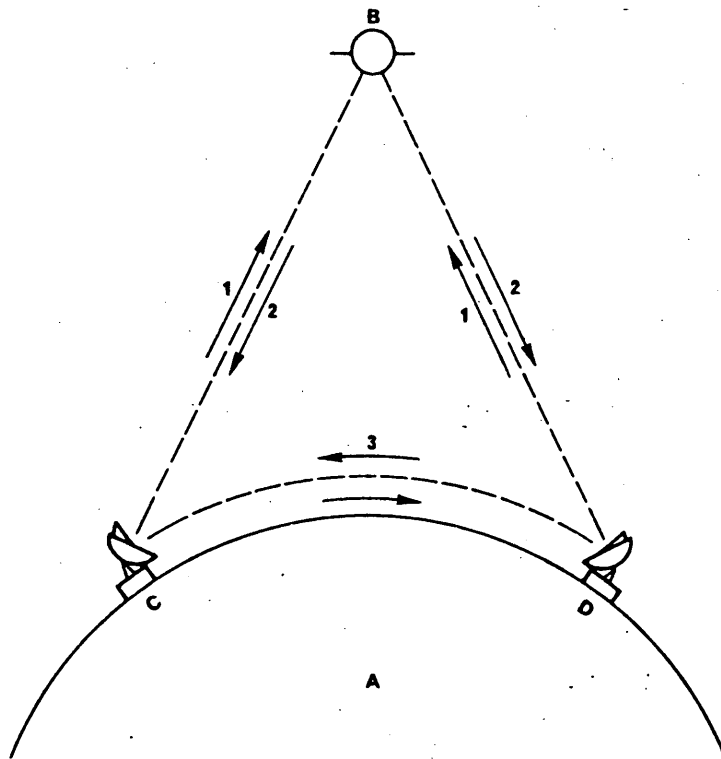


РИСУНОК 1 — Спутниковая система передачи времени

- A: Земля
- B: Спутник, передающий время
- C: Земная станция № 1
- D: Земная станция № 2
- 1: Линия Земля—космос
- 2: Линия космос—Земля
- 3: Наземное расстояние

ТАБЛИЦА I — Предлагаемые частоты — спутниковая система передачи времени

Предлагаемый рабочий диапазон центральной частоты (ГГц)	Предлагаемая ширина полосы радиочастот (ГГц)	Другие распределения (существующие и возможные)	Действующие ограничения (Регламент радиосвязи МСЭ)
13,4—14,0 (линия вверх)	$\pm 0,125$ (0,25)	Радиолокация Спутник для исследования земной поверхности (активный датчик) Космические исследования (Земля—космос)	э.и.и.м. + 40дБ (Вт/4 кГц), $\theta \leq 0^\circ$ э.и.и.м. (+ 40 + 30) дБ (Вт/4 кГц), $0^\circ < \theta \leq 5^\circ$ Нет ограничений на радиолокацию
20,2—21,2 (линия вниз)	$\pm 0,125$ (0,25)	Фиксированная спутниковая связь (космос—Земля) Подвижная связь (космос—Земля)	} Ограничения не указаны
25,27—27,5 (линия вверх)	$\pm 0,6$ (1,2)	Фиксированная связь Подвижная связь EES (космос—Земля)	
30,0—31,3 (линия вниз)	$\pm 0,6$ (1,2)	Фиксированная спутниковая связь (Земля—космос) Фиксированная связь Подвижная связь Космические исследования Подвижная спутниковая связь (Земля—космос)	э.и.и.м. $\leq +64$ дБ (Вт/МГц), $\theta \leq 0^\circ$ э.и.и.м. $\leq (+64 + 30)$ дБ (Вт/МГц), $0^\circ < \theta \leq 5^\circ$ Еще не установлены

ТАБЛИЦА II — Спутниковая система передачи времени —
сводные характеристики

Земная станция	
Излучаемая мощность	100 Вт
Усиление антенны (допустимое)	53 дБ
Вид модуляции	Код PRN
Температура шумов приемника	1000 К (-6 дБ NF)
Ширина полосы до детектирования	250 МГц, 1,2 ГГц
Ширина полосы после детектирования	1 МГц
Выигрыш при обработке сигнала	24 дБ, 30,8 дБ
Постдетекторное отношение сигнал/шум	18 дБ
Спутник	
Излучаемая мощность	50 Вт
Усиление антенны	4 дБ (угол на Землю)
Вид модуляции	PRN код
Температура шумов приемника	1000 К
Ширина полосы до детектирования	250 МГц, 1,2 ГГц
Ширина полосы после детектирования	1 МГц
Выигрыш при обработке сигнала	24 дБ, 30,8 дБ
Постдетекторное отношение сигнал/шум	18 дБ

ТАБЛИЦА III — Типичные рабочие характеристики
радиолокационной системы

Пиковая мощность сигнала	25 кВт
Длительность сигнала	32 нс
Время нарастания сигнала	12 нс
Частота повторения импульсов	15 кГц
Средняя мощность	12 Вт
Частота (несущая)	~ 14 ГГц
Чувствительность приемника	- 85 дБ(м)
Коэффициент шума приемника	11 дБ (T_s - 3400 К)
Отношение сигнал/шум (необходимое для работы)	12 дБ
Ширина полосы промежуточной частоты	40 МГц
Изотропное усиление антенны	35 дБ
Боковые лепестки	25 дБ ниже главного лепестка
Угол наклона антенны	0°
Частота сканирования антенны	135 об/мин
Диаграмма излучения антенны	10°, вертикальная ширина луча 0,34°, горизонтальная ширина луча

Излучение основного луча передатчика радиолокационной системы иногда может непосредственно попасть на приемную антенну спутника, когда спутник, используемый в системе передачи времени, находится в зоне наблюдения и выше горизонта радиолокационной системы менее чем на 10° (что обусловлено вертикальной шириной луча, принятой равной 10°). В этом случае плотность мощности помехи в приемнике на борту спутника равна:

$$D_r = P_t + G_t - B_t - 10 \log(4\pi R^2) + 10 \log\left(\frac{G_r \lambda^2}{4\pi}\right)$$

$$D_r = -179 \text{ дБ (Вт/Гц)},$$

где:

D_r — плотность мощности помехи, дБ (Вт/Гц),

P_t — средняя мощность передатчика, дБВт,

G_t — усиление антенны передатчика, дБ,

B_t — ширина полосы пропускания передатчика, дБ (1 Гц),

R — расстояние между передающей и приемной антеннами, м (3709×10^3 м для орбиты спутника 1000 км),

G_r — усиление антенны приемника, дБ,

λ — рабочая длина волны, м.

Расчетная плотность мощности сигнала (по приведенному выше выражению плюс выигрыш при обработке сигнала, 24 дБ) равна -169 дБ (Вт/Гц), таким образом, величина отношения несущая/помеха (C/I) в худшем случае достигает 10 дБ. Это отношение соответствует необходимому уровню защиты системы передачи сигналов времени в течение всей работы.

4. Частотное разделение с фиксированной спутниковой службой (космос—Земля)

Спутниковая система передачи времени по линии вниз, предлагаемая вблизи 21 ГГц, должна разделять полосу частот с фиксированной и подвижной спутниковыми службами (космос—Земля). Для того чтобы разделение частот в этой полосе стало возможным, плотность потока мощности у поверхности Земли должна быть меньше предельных значений, указанных в Регламенте радиосвязи (пп. 2577—2585) (см. таблицу I). Кроме того, угловое разрешение, обусловленное направленностью антенны фиксированной спутниковой службы (ФСС), может быть использовано для обеспечения дополнительной защиты путем ограничения спутниковых передач в пределах минимального углового разнесения от оси антенны земной станции фиксированной спутниковой службы.

Плотность потока мощности (PFD) на земной станции фиксированной спутниковой службы описывается выражением:

$$\begin{aligned} \text{PFD} &= P_t + G_t - B_t - 10 \log(4\pi R^2) \\ &= -145 \text{ дБ (Вт/(м}^2\text{ МГц))}. \end{aligned}$$

Критерии помех, разработанные на ВАКР-BS-77, определяют максимальную величину отношения помеха/несущая -35 дБ для защиты систем связи фиксированной спутниковой службы. В Отчете 561 прогнозируется значение PFD несущей в линии вниз ФСС у поверхности Земли порядка $-124,0$ дБ (Вт/(м² МГц)). Это значение PFD соответствует отношению несущая/помеха, равному 21 дБ. Требуемая дополнительная развязка на 14 дБ (допуская, что усиление антенны ФСС составляет 60 дБ и что огибающая бокового лепестка соответствует стандарту МЭК) может быть получена за счет подавления передачи в пределах $0,3^\circ$ от оси антенны земной станции ФСС. Это угловое разнесение получается из:

$$G = 32 - 25 \log \theta,$$

где G — максимальное усиление антенны для угла θ от оси антенны.

Таким образом:

$$(60 - 14) = 32 - 25 \log \theta,$$

$$\theta = 0,3^\circ.$$

Существует возможность внедрения в будущем земных станций фиксированной спутниковой службы с более высокой чувствительностью, чем это описано в Отчете 561. Например, если бы земная станция фиксированной спутниковой службы имела следующие характеристики:

— мощность шумов земной станции на входе приемника:	-143,6 дБ (Вт/МГц),
— требуемая величина отношения несущая/шум на линии вниз:	15 дБ,
— усиление антенны земной станции:	65 дБи,

PFD сигнала в линии связи фиксированной спутниковой службы у поверхности Земли составила бы -146 дБ (Вт/(м² · МГц)). Это приблизительно такое же значение, как и в спутниковой системе передачи времени. Для обеспечения защиты этой фиксированной спутниковой системы с высокой чувствительностью (то есть для обеспечения отношения несущая/помеха, равного 35 дБ) работа спутниковой системы передачи времени по линии вниз должна ограничиваться на то время, пока спутник находится в пределах примерно 1,2° от основного луча земной станции.

Земная станция с высокой чувствительностью вышеуказанного типа могла бы иметь ширину луча порядка 0,048°. В наихудших условиях, при которых система управления спутника, передающего время, вышла бы из строя, а спутник продолжал бы передачу, такая земная станция фиксированной спутниковой службы могла бы принимать помехи по основному лучу в течение 1,7 × 10⁻⁷% времени, или приблизительно 5 с в год. Наибольшая возможная продолжительность связи по главному лепестку с однократным прохождением сигнала для данного случая составляет примерно 0,4 с. Учитывая полный раскрыт конуса 1,2° для опорного наземного пункта, в течение 0,01% времени, пока не будет устранен отказ спутника системы передачи времени, отношение несущая/помеха, вероятно, могло бы составлять менее 35 дБ.

5. Частотное разделение с фиксированной спутниковой службой (Земля—космос)

Предлагаемая спутниковая система передачи времени по линии вниз в полосе частот вблизи 31 ГГц могла бы использовать часть полосы, распределенной линиям вверх фиксированной спутниковой службы, совместно с этой службой. Взаимные помехи между передатчиками земной станции фиксированной спутниковой службы и приемниками земной станции системы передачи времени можно предотвратить за счет координации параметров станции, местоположения станции, ориентации антенны и т. д. Помехи между передатчиком спутника, передающего время, и приемником спутника фиксированной спутниковой службы маловероятны из-за относительно небольшой величины э.и.и.м. и относительно больших расстояний. Например, плотность потока мощности помех в приемнике ФСС определяется выражением

$$\begin{aligned} \text{PFD}_i &= P_i + G_i - B_i - 10 \log (4\pi R^2) \\ &\leq 17 + 0 - 84 - 11 - 151 = -229 \text{ дБ (Вт/(м}^2 \text{ Гц))}. \end{aligned}$$

Точно так же плотность потока мощности несущей равна:

$$\begin{aligned} \text{PFD}_c &= P_i + G_i - B_i - 10 \log (4\pi R^2) \\ &\leq 8,3 - 11 - 152 = -155 \text{ дБ (Вт/(м}^2 \text{ Гц))}. \end{aligned}$$

(при плотности э.и.и.м. удельной мощности = 8,3 дБ (Вт/Гц) и R ≈ 41 500 км)

Таким образом, отношение несущая/помеха примерно будет равно +74 дБ.

6. Частотное разделение с фиксированной и подвижной службами

Частотное разделение между спутниковой системой передачи времени по линии вверх (~26 ГГц) и фиксированной и подвижной службами будет возможно, если будут выполнены два требования. Первое из них состоит в том, что э.и.и.м. передатчика, используемого для передачи времени, должна лежать в пределах, указанных в Регламенте радиосвязи (п. 2542). Второе требование заключается в том, что должен обеспечиваться достаточный уровень отношения несущая/помеха для исключения взаимных вредных помех.

Для земных станций, работающих в полосах частот выше 15 ГГц, требуются следующие значения плотности э.и.и.м.:

$$\begin{aligned} 64 \text{ дБ (Вт/1 МГц)} \quad \theta \leq 0^\circ, \\ 64 + 3 \theta \text{ дБ (Вт/1 МГц)} \quad 0^\circ < \theta < 5^\circ. \end{aligned}$$

Для земной станции системы передача времени:

$$\text{э.и.и.м.} \leq 20 + 71 + -24 = 67 \text{ дБ (Вт/МГц)}.$$

Таким образом, если $\theta \geq 1,0^\circ$, первое ограничение удовлетворяется.

Второе ограничительное требование, то есть достаточный уровень отношения несущая/помеха, может быть выполнено путем координации параметров станции (то есть усиления, мощности и т. д.), местоположения, высоты антенны, ориентации антенны и т. д. Например, если две станции с антеннами высотой 15 м разделяют полосу частот при

$$d \geq \sqrt{17 \times 15} + \sqrt{17 \times 15} \geq 32 \text{ км},$$

каждая из них находится ниже радиогоризонта другой.

Разделение частот вблизи 31 ГГц между системой передачи времени по линии вниз и фиксированной и подвижной службами будет установлено путем определения оптимального соотношения между уровнем помех и процентом времени работы, в течение которого они [помехи] имеют место.

Плотность мощности помех на входном каскаде приемника равна:

$$P_I = E_T + G_r - L,$$

где:

$$E_T = \text{плотность э.и.и.м. передатчика} = P_T + G_T - B_T \\ = 17 + 4 - 84 = -63 \text{ дБ (Вт/Гц)},$$

L — потери на распространение = $92,5 + 20 \log f + 20 \log R$,

f — рабочая частота, ГГц,

R — расстояние, км.

При $R = 3709$ км ($L = 193,7$ дБ) и $G_R = 60$ дБи $P_I = -196,7$ дБ (Вт/Гц).

Из Отчета 686 для радиорелейной сети из 5 станций:

$$P_I = -196,2 + 10 \log \left(\frac{X}{1250} \right),$$

где X — допустимая помеха, измеренная психофизически, (пВт_{псиф.}).

Разрешение для $P_I = -196,7$ дает

$$X = 1114 \text{ пВт}_0^{\text{псиф.}}$$

$$\text{или } -59,5 \text{ дБм}_0^{\text{псиф.}}$$

В соответствии с Рекомендацией 357 этот уровень мощности помех может испытывать аналоговая радиорелейная система с угловой модуляцией почти 20% рабочего времени. Отчет 684, в котором исследуются статистические данные о видимости низкоорбитальных спутников, показывает, что одна станция может обнаружить спутник на низкой орбите в пределах своего основного луча менее чем за 1,0% времени. Таким образом, система передачи времени может использовать одну и ту же полосу частот совместно с фиксированной и подвижной радиорелейными системами, не причиняя друг другу вредных помех. Помехи в работе приемников земных станций системы передачи времени, создаваемые передатчиками фиксированной и подвижной служб, могут быть устранены путем координации параметров станций, местоположения, ориентации антенн и т. д.

7. Выводы

Разделение частот между спутниковой системой передачи времени и радиолокационной службой вблизи 14 ГГц технически осуществимо. Помехи в работе радиолокационной системы, создаваемые земными станциями спутниковой системы передачи времени, можно предотвратить за счет координации между этими двумя системами. При этом эквивалентная изотропно излучаемая мощность земных станций системы передачи времени должна соответствовать ограничениям, приведенным в п.2541 Регламента радиосвязи. Радиочастотная энергия, излучаемая передатчиками радиолокационной системы, не должна создавать помехи работе системы распространения времени.

Также вполне возможно разделение частот вблизи 21 ГГц между линией вниз системы передачи времени и линиями космос-Земля фиксированной спутниковой службы. Передатчик, находящийся на борту спутника системы передачи времени, должен удовлетворять требованиям п.2578 Регламента радиосвязи, ограничивающим плотность потока мощности у поверхности Земли. Более того, спутник системы передачи времени должен быть запрограммирован таким образом, чтобы исключить передачу в полосе частот вблизи 21 ГГц, когда он находится в пределах $0,3^\circ$ от главной оси приемной антенны земной станции фиксированной спутниковой службы.

В полосе частот вблизи 31 ГГц возможно частотное разделение между линией вниз спутниковой системы передачи времени и линиями вверх фиксированной спутниковой службы для параметров систем, приведенных в этом Отчете. Для защиты системы времени от вредных помех потребуются координация между земными станциями фиксированной спутниковой службы и системы передачи времени.

Частотное разделение в полосе частот вблизи 26 ГГц между системой передачи времени по линии вверх и фиксированной и подвижной службами возможно при условии, что мощность передатчика не превышает 100 Вт при использовании антенны с усилением не более 71 дБ и углом возвышения по меньшей мере 1° над горизонтом. Потребуется координация земной и трансляционных станций.

Разделение в полосе частот вблизи 31 ГГц между системой передачи времени по линии вниз и фиксированной и подвижной службами возможно при условии, что мощность спутникового передатчика не превышает 50 Вт, а усиление спутниковой антенны составляет не более 4дБ. Для улучшения отношений сигнал/шум без повышения уровня мощности помех должно использоваться PRN кодирование.

ОТЧЕТ 896-1

ДОКУМЕНТАЦИЯ ПО ИЗМЕНЕНИЯМ В ПЕРЕДАВАЕМЫХ СИГНАЛАХ ВРЕМЕНИ

(Вопрос 1/7)

(1982—1986)

1. Введение

С помощью дискретной коррекции или изменений значений сигналов времени сигналы, передаваемые различными станциями стандартного времени, поддерживаются в установленных пределах по отношению к шкале времени, определенной по вращению Земли. В настоящее время в большинстве стран передаются сигналы UTC.

2. Сигналы времени США

Дискреты коррекции шкалы времени и частоты сигналов WWV Национального бюро стандартов и первичных часов Военно-морской обсерватории США (USNO) сообщались на период 1956—1971 годов [МККР, 1978—82]. С 1972 года делались поправки к UTC.

3. Сигналы времени JJY

Дискреты коррекции шкалы времени и частоты сигналов JJY Исследовательской лаборатории по радио (RRL) (Япония) сообщались в [МККР, 1982—86]. С января 1955 года по август 1961 года время и частота сигналов JJY поддерживались в соответствии со шкалой UT2, которая была установлена Токийской астрономической обсерваторией (ТАО). Система UTC была введена с 1 сентября 1961 года.

4. До введения современной системы UTC (в соответствии с Рекомендацией 460) использовались различные методы корректировки сигнала времени. Подробная информация об этих корректировках должна оставаться доступной для справочных целей. Администрации ФРГ, Франции, Японии, Соединенного Королевства и США передали эту информацию в Международное бюро мер и весов (МБМВ), которое в соответствии с предложением, зафиксированным в Мнении 71, согласилось хранить ее в базе данных. Кроме того, источником аналогичной информации могли бы стать соответствующие всемирные центры данных.

ССЫЛКИ

Документы МККР

[1978—82]: 7/103 (США).

[1982—86]: 7/4 (Япония).

ОТЧЕТ 897-2

МЕТОДЫ ТОЧНОЙ ПЕРЕДАЧИ ВРЕМЕНИ НА КОРОТКИЕ РАССТОЯНИЯ

(Исследовательская программа ЗС/7)

(1982—1986—1990)

1. Введение

Существует необходимость в сличении шкал времени отдельных местных пунктов, разнесенных друг от друга на небольшое расстояние, обычно менее 100 км. Рассматриваемые в настоящем Отчете отдельные пункты считаются местными в том смысле, что они имеют общую среду распространения сигналов. К ним относятся пункты, находящиеся в пределах прямой видимости или в пределах досягаемости коаксиальных или волоконно-оптических кабелей либо перевозимых часов.

2. Метод одновременного наблюдения

Широко используемый метод синхронизации частоты и времени (см. Отчет 363) заключается в общем мониторинге радиосигнала, который могут принять оба пункта одновременно (сигналы Logan-C, телевизионной линии, телевизионной несущей, ВЧ, НЧ, ОНЧ со стабилизированной несущей, Omega); далее осуществляется сравнение разницы между внешним сигналом и внутренним сигналом, генерируемым местным стандартом на каждом пункте. Одновременное наблюдение сигналов со спутника с помощью независимых наземных приемников является примером одного из наиболее перспективных методов [Taylor, 1974], хотя у него и имеется недостаток, заключающийся в том, что должна быть прокалибрована разница путей распространения сигнала.

3. Волоконно-оптические кабели

На расстояниях, на которых для соединения пунктов может использоваться коаксиальный кабель, двустороннее распространение сигналов является средством калибровки длины пути распространения и прямого сличения сигналов для синхронизации частоты и времени [Rueger и Bates, 1979].

Экспериментальная линия передачи сигналов времени и частоты, использующая волоконную оптику с несущей 850 нм и модуляцией 100 МГц, была испытана в Лаборатории реактивного движения. На трассе протяженностью 3 км была получена нестабильность 3×10^{-15} при усреднении за 100 с и 1×10^{-16} при усреднении за 1000 с. Для компенсации изменений задержки распространения сигнала волоконно-оптическая линия подстраивалась по непрерывно измеряемой двусторонней задержке в отдельно взятом волокне с коррекцией фазы на входе, в результате чего обеспечивалась постоянная фаза на приемном конце. Последующие измерения на некомпенсированной одномодовой волоконно-оптической линии (на волне 1400 нм) протяженностью 14 км дали нестабильность $\sigma_y(\tau) = 1,2 \times 10^{-15}$ при $\tau = 1000$ с. Этот кабель был проложен в земле на глубине 1,5 м между двумя станциями Сети дальнего космоса NASA/JPL в Голдстоне (Калифорния) [Lutes, 1982; 1987].

В Техническом университете в Граце была разработана и построена с использованием имеющихся в наличии компонентов многомодовая волоконно-оптическая система для передачи частоты и времени на расстоянии до нескольких сот метров. По стоимости и рабочим характеристикам данная система сопоставима со стандартным оборудованием, используемым в лабораториях хранения времени. Отклонения (выход по сравнению со входом; стандартная девиация 100 мгновенных значений сигнала) значительно ниже 50 пс, а изменения времени задержки распространения сигнала в передатчике и приемнике, вызванные колебаниями температуры, ниже 30 и 50 пс/°C, соответственно. Изменения времени задержки сигнала в кабелях длиной 100 м составили 5—17 пс/°C [Kirchner и Ressler, 1984].

4. Линии связи прямой видимости

На некоторых расстояниях линии связи прямой видимости, использующие радиоволны, включая СВЧ радиоволны или лазерные лучи, являются весьма экономичным вариантом для передачи сигналов времени и частоты по одностороннему или отраженному двустороннему пути распространения. Двусторонний метод обеспечивает контроль изменений длины пути распространения сигналов под влиянием различных факторов, таких как температура, влажность, облачность, туман или дождь, но имеет недостатки, связанные с проблемой многолучевости, в зависимости от расчетных параметров передающей и приемной антенн, их расположения относительно препятствий или отражающих поверхностей вблизи линии прямой видимости.

Между Годдардовским оптическим научно-исследовательским центром (GORF) (телескоп диаметром 1,2 м) и Отделом службы времени Военно-морской обсерватории США (USNO) была установлена горизонтальная воздушная линия для сличения времени двусторонним методом с использованием аппаратуры Мэрилендского университета, предназначенной для определения расстояния до пользователей и передачи времени. Длина нескорректированного пути распространения сигнала в одну сторону составляет 26 км. Два оптических уголкового отражателя в USNO, идентичные установленным на Луне в ходе выполнения программы «Аполлон», отражают лазерные сигналы обратно в GORF. Генерируемые неодимовым YAG лазером световые сигналы длительностью 100 пс и мощностью в несколько сот микроджоулей (после удвоения длина волны составляет 532 нм (зеленый цвет)) передаются со скоростью 10 импульсов в секунду. На приемном конце в USNO детектирование производится лавинным фотодиодом; обработка результатов выполняется вычислительным счетчиком и компьютером с опорой на первичные часы (10 импульсов в секунду). Стандартная девиация в серии из 100 сличений обычно составляет 200—400 пс. Соответствующая стандартная девиация для одного сличения в среднем составляет 20—40 пс. Точность калибровки, установленная с помощью перевозимых часов, в настоящее время составляет 1—2 нс [Alley и др., 1982].

В 1982 году подобный метод был использован в экспериментах по сличению шкал времени путем передачи лазерных импульсов между двумя отделениями Шанхайской обсерватории, разнесенными на расстояние 25,2 км. Среднеквадратическая флуктуация разности шкал двух стандартов (двух станций) составила ± 8 нс при единичном измерении и около $\pm 1,3$ нс после усреднения на двухминутном интервале [Yang и др., 1983].

5. Общие замечания

Сигналы времени для целей синхронизации характеризуются временем нарастания, доступной шириной полосы частот и стабильностью фазы временной задержки при прохождении через среду распространения и измерительную аппаратуру.

На практике принято калибровать различные длины путей распространения путем транспортировки точных часов между двумя пунктами, допуская, что в показания перевозимых часов могут быть внесены поправки, учитывающие скорость их транспортировки и гравитационные поправки [Allan и Ashby, 1979].

Диапазон возможностей для высококачественной работы, реализуемый различными методами, приведен в таблице I для расстояний около 100 км и менее.

ТАБЛИЦА I — Погрешности передачи времени на короткие расстояния

Метод передачи времени		Погрешность передачи времени	Существующий статус	Калибровка ⁽¹⁾
Перевозимые часы	[Rogers и др., 1977]	2 нс	Стандартный	
Телевизионная линия	[Lavanceau и Shephard, 1978]	10 нс	Стандартный	X
Телевизионная несущая	[Lavanceau и Shephard, 1978]	0,1 нс	Стандартный	X
Радиорелейная линия	[MacConnell и др., 1977; Norton и др., 1962]	2 пс 2—50 пс	Экспериментальный	X ⁽²⁾
Коаксиальный кабель	[Rueger и Bates, 1979]	0,2 нс	Стандартный	X ⁽²⁾
Loran-C	[Winkler, 1972]	0,1 мкс	Стандартный	X
ОНЧ (Omega)	[Cooper и Chi, 1979]	1,5 мкс	Экспериментальный	X
ВЧ сигналы времени		1 мс	Стандартный	X
Телефония 10 кГц		10—100 мкс		X
Оптическая линия				
Волоконно-оптические кабели		10 мкс	Экспериментальный	X ⁽²⁾
Лазер	[Besson, 1970]	0,1 нс	Экспериментальный	X
Геодиметр	[Levine, 1978; Faller и Faller, 1977]	2 пс	Экспериментальный	
Спутниковые линии				
Спутник GOES	[Beehler и др., 1979]	1 мкс	Стандартный	
Спутник TRANSIT	[Laidet, 1972; Beehler и др., 1979]	1—5 мкс	Стандартный	
Спутник TRANSIT (программа мониторинга окружающей среды)	[Taylor, 1974; Rueger и Bates, 1979]	10 нс	Экспериментальный	
Глобальная система определения местоположения	[Schuchman и Spilker, 1977]	10 нс	Конструкторский потенциал	
Радиовещание	[МККР 1970—74a]	6 мкс	Стандартный	X
Линия электропередачи 50—60 Гц	[МККР, 1970—1974b и c]	0,25 мс	Стандартный	X

⁽¹⁾ Калибровка устройств и установки необходима для обеспечения указанной погрешности передачи времени. Методы, отмеченные знаком «X», требуют независимой калибровки пути распространения.

⁽²⁾ Для двусторонней работы не требуется внешняя калибровка.

ССЫЛКИ

- ALLAN, D. and ASHBY, N. [1979] Practical applications of relativity for a global coordinate time scale. *Radio Sci.*, Vol. 14, 649—669.
- ALLEY, C.O., RAYNER, J.D., STEGGERDA, C.A., MULLENDORF, J.V., SMALL, L. and WAGNER, S. [1982] Time transfer between the Goddard optical research facility and the US Naval Observatory using 100 picosecond laser pulses. Proc. 14th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA, 244.
- BEEHLER, R.E., DAVIS, D.D., CATEORA, J.V., CLEMENTS, A.J., BARNES, J.A. and MENDEZ-QUINONES [November 1979] Time recovery measurements using operational GOES and TRANSIT satellites. Proc. 11th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA, 283—315.

- BESSON, R.J. [1970] Comparison of national time standards by simple overflight. *IEEE Trans. Instr. and Meas.*, Vol. IM-19, 4, 227—232.
- COOPER, R.S. and CHI, A.R. [1979] A review of satellite time transfer technology: Accomplishments and future applications. *Radio Sci.*, Vol. 14, 605—619.
- FALLER, J.E. and FALLER, J.L. [1977] Measurement of the position of points on the earth surface using absolute gravimeter and a multi-wavelength geodimeter as complements of extra-terrestrial techniques. Ed. J.D. Mulholland, *Scientific Application of Lunar Laser Ranging*, 277—283.
- KIRCHNER, D. and RESSLER, H. [December 1984] A fibre optic time and frequency distribution system. *CSTG Bull.*, 7, 171—175.
- LAIDET, L.M. [May 1972] Worldwide synchronization using the TRANSIT Satellite System. *Proc. IEEE (Lett.)*, Vol. 60, 630—632.
- LAVANCEAU, J.D. and SHEPHARD, L.F. [1978] Real time distribution via passive TV networks. Proc. 9th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Greenbelt, Md., USA, 249—276.
- LEVINE, J. [1978] Multiple wavelength geodesy. Proc. 9th GEOP Conference, Columbus, Ohio, USA.
- LUTES, G. [September 1982] Optical fibre applications in the NASA deep space network. *Laser Focus*, Vol. 18, 9, 115—121.
- LUTES, G. [May 1987] Reference frequency transmissions over optical fibers. Proc. 41st Annual Symposium on Frequency Control, 161—166.
- MacCONNELL, J.W., SYDNOR, R.L. and HINSHAW, J.T. [1977] A precision microwave frequency and time distribution system. Proc. 9th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Greenbelt, Md., USA.
- NORTON, K.A., BARROWS, E., THOMPSON, M.C., Jr. and JAMES, H.B. [December 1962] Variance of radio frequency caused by turbulence on line-of-sight transmission. *IRE Trans. P.G.I.*
- ROGERS, A.E.E et al. [1977] Clock synchronization via very long baseline interferometry. Proc. 9th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Greenbelt, Md., USA, 127—134.
- RUEGER, L.J. and BATES, A.G. [July—August 1979] NOVA satellite time experiment. *Radio Sci.*, Vol. 14, 4, 707—714.
- SCHUCHMAN, L. and SPILKER, J. [1977] Time transfer via GPS. Proc. 9th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Greenbelt, Md., USA.
- TAYLOR, R.J. [29—31 May 1974] Satellite Transit to ground timing experiments. Proc. 28th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 384—388 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).
- WINKLER, G.M.R. [1972] Recent experiments with flying atomic clocks, LORAN-C (etc.) for clock synchronization. Report to XVII General Assembly, URSI, Warsaw, People's Republic of Poland.
- YANG, F., ZHUANG, Q., SU, J., TAN, D., LI, Zh. and CAI, J. [1983] Time comparison experiment via laser pulses. *Kexue Tongbao*, Vol. 12, 746—757.

Документы МККР

[1970—74]: а. 7/2 (Япония); б. 7/57 (Федеративная Республика Германии); с. 7/82 (Италия).

ОТЧЕТ 1016-1

ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ МЕТОДЫ ПЕРЕДАЧИ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВРЕМЕНИ
И ЧАСТОТЫ

(Исследовательская программа 3С/7)

(1986—1990)

Телевизионные сигналы хорошо подходят для передач времени и частоты с различным уровнем точности и для сличений шкал времени; среди преимуществ таких сигналов следует отметить:

- возможность покрытия большой территории с высокой интенсивностью сигнала;
- структуру сигналов, основанную на времени, и широкие полосы частот в распределенных диапазонах частот;
- низкую стоимость приемного оборудования;
- возможность прогнозирования времени распространения сигналов.

Для сличения шкал времени по телевизионным каналам были разработаны несколько различных методов. Разработанный первым метод Толмана и др. [1967] заключается в одновременном измерении времени прихода выделенных синхросигналов. Эта система широко используется в Китайской Народной Республике [МККР, 1974—78а], Европе [Rovera, 1972; Allan и др., 1970; Parcelier, 1976; Parcelier и Fréon, 1977; Becker и Enslin, 1972], Японии [Saburi и др., 1978] и Соединенных Штатах Америки [Allan и др., 1972; Davis и др., 1971], где она известна под названием Line-10.

Телевизионные синхросигналы используются как общие эталонные маркеры при многих сличениях шкал времени на национальном, а иногда и на международном уровне. Определение задержки распространения осуществляется с помощью перевозимых часов или другими подходящими методами. При сличении шкал времени в пределах прямой видимости с использованием одного и того же телевизионного передатчика неопределенность измерения разности шкал может составлять 10 нс или менее.

Телевизионные сигналы, излучаемые различными передатчиками, могут использоваться для сличений шкал времени или частоты только в том случае, если время распространения сигналов по каналам между передатчиками или постоянно, или ограничено малым числом постоянных и различных значений. Необходимо также, чтобы не использовался кадровый синхронизатор. Такие синхронизаторы запоминают полный кадр изображения в цифровой форме и передают его синхронно с местными часами. Неопределенность времени распространения сигналов, возникающая в каналах между передатчиками, обычно составляет менее 1 мкс, если сигналы передаются по одному каналу, но может достигать и нескольких микросекунд. Более значительные изменения времени распространения могут возникнуть при использовании различных каналов передачи телевизионных сигналов.

В Пекинской обсерватории в Китайской Народной Республике применяется метод измерения задержек телевизионных сигналов «звено за звеном» для определения суммарной задержки распространения. Этот метод рассчитан на использование только простой аппаратуры и стандартного оборудования. Результаты были проверены и сравнены с данными, полученными с помощью перевозимых часов и синхронизацией по сигналам Logan-C; систематические девиации различных модификаций метода находились в пределах 1 мкс.

Изменяющиеся и неопределенно большие задержки могут возникать на линиях, на которых используются спутники, или в случае применения памяти на кадры, где вход и выход контролируются различными часами. Например, это происходит в кадровых синхронизаторах и в стандартных преобразователях, и ожидается рост их использования. Хотя этот метод, с одной стороны, может ограничить использование в будущем больших телевизионных сетей для распространения времени и частоты, он, с другой стороны, может упростить использование таких сетей на местном уровне, позволяя осуществлять активный и независимый контроль за синхронизацией сигналов в пределах подсети и после их прохождения через спутниковую линию.

Эксперименты с перевозимыми часами, проводившиеся в течение 7 лет на регулярной основе Шаньсийской, Шанхайской и Пекинской обсерваториями, показали, что точность сличений с использованием сигнала синхронизации телевизионной строки 6 составляет 2 мкс и лучше и позволяет проводить ежедневную калибровку частоты стандартов с погрешностью около $(2 - 20) \times 10^{-13}$ на расстояниях до 2000 км.

В Японии удалось повысить стабильность измерительной аппаратуры, необходимой для использования этого метода, за счет стабилизации частоты местного генератора в селекторе телевизионных каналов и путем автоматической регулировки усиления (APУ) в усилителе промежуточной частоты с прецизионным управлением напряжения. Были получены более высокие значения кратковременной и долговременной стабильности, составившие около 10 и 30 нс соответственно [Inoue и Nara, 1978; МККР, 1974—78b]. Кроме того, последние эксперименты показали, что значительного улучшения стабильности можно достичь за счет измерения заднего фронта синхросигнала, а не его переднего фронта. Таким образом, при чисто дифференциальных измерениях с использованием одного и того же синхросигнала измерение заднего фронта сигнала, крутизна которого способствует получению более высокой точности, неизменно дает отличные результаты [Saburi и др., 1978].

Однако следует отметить, что время *переднего* фронта сигнала относительно известного эталона времени в основном контролируется лучше, чем время заднего фронта. Таким образом, при измерениях временной разницы между сигналом местных часов и конкретным синхронизированным телевизионным сигналом более точные результаты могут быть получены при использовании переднего фронта сигнала.

Были специально сконструированы несколько вариантов телевизионных приемников для проведения ежедневных сличений 15 часов в различных лабораториях в разных частях Франции, на основе результатов которых формируется шкала TA(F) [Parcelier, 1976]. Измерения осуществляются по сигналам, используемым для проверки частотных характеристик в испытательной линии, и автоматически инициируются местными часами. Настройка приемника регулируется по оптимальной форме принятого телевизионного сигнала; используемая система APУ и контроль за уровнем сигнала обеспечивают, чтобы содержимое телевизионного сигнала не влияло на результаты измерений. Одновременные 30-минутные измерения с помощью двух находящихся вблизи друг от друга комплектов оборудования дали дисперсию 1σ в ± 5 нс от среднего значения; точность 40—50 нс получена при регулярной нормальной работе в сериях из 15 или 30 последовательных измерений на расстояниях в несколько сот километров.

В СССР проводились эксперименты с включением маркеров секунды в шестую строку видеосигнала с возможностью дистанционного управления относительно UTC(S). Кроме того, был включен код текущего времени [Борисочкин и Федотов, 1982].

Двое цезиевых часов, одни — в Бретани, а другие — в Париже, сравнивались в течение месяца путем ежедневных телевизионных измерений, а также с использованием экспериментов с шестью перевозимыми часами [Parcelier и Fréon, 1977]. Стандартная девиация разницы между двумя методами сличения на время исследований составила примерно 15 нс. Последний эксперимент с перевозимыми часами, проведенный 2,5 месяцами позже, дал результат, превышающий на 28 нс результат, полученный в ходе телевизионного эксперимента.

В трех токийских лабораториях, находившихся в пределах 20 км от телевизионного передатчика, в течение 7 лет на регулярной основе проводились сличения часов с помощью телевизионных сигналов, а также было осуществлено 8 измерений по перевозимым часам. Стандартная девиация разницы между двумя методами составила около 50 нс. Учитывались изменения задержки приема, определенные по местным калибровкам, проведенным с помощью перевозимых часов.

Приемник, разработанный в Швейцарии, проводит измерения по переднему фронту строчного синхросигнала и осуществляет автоматический контроль частоты и точную стабилизацию уровней сигнала по переднему и заднему фронту. Измерения сигналов, излучаемых одним и тем же передатчиком, на двух приемниках, расположенных в одном месте, показали дисперсию 1σ ниже 1 нс при усреднении за 10 с и более, но для сигналов с различных передатчиков значение дисперсии 1σ увеличивается с 1 до 3 нс по мере увеличения времени усреднения с 50 до 500 с [МККР, 1974—78c].

Об использовании подобного метода в USNO сообщили Лавансо и Кэрролл [1971]. Этот метод включает в себя стабилизацию цветовой поднесущей по цезиевому стандарту частоты телевизионной студии. Строка 10 синхросигнала также контролируется и поддерживается в синхронизированном режиме по «Таблице совпадения» (ТОС), опубликованной USNO для использования с системой NTSC и сходной с ТОС системы Logan-C.

В отличие от еженедельных бюллетеней ТОС, публикуемых USNO (Сообщения службы времени, серия 4), в Японии [Saburi и др. 1978] было предложено публиковать ежедневные бюллетени ТОС.

Национальное бюро стандартов США разработало и провело испытания метода передачи времени по каналам телевидения путем кодирования данных в определенных строках телевизионного сигнала. Сначала были использованы 13—16 строки, а затем строка 1 и, кроме того, строка 21. В эту систему передач был включен эталонный сигнал 1 МГц [Davis и др., 1970; Howe, 1972].

Телевизионные системы, используемые в Европе, имеют номинальные скорости повторения кадров раз-
вертки 25 Гц, и маркеры секунды UTC, в принципе, могут быть введены в кадр на фиксированную позицию.

Государственная телевизионная сеть Югославии используется подобным образом для передачи сигналов времени и частоты, генерируемых цезиевыми часами в радиостудии Белграда. Секундные сигналы по шкале UTC (Югославия) вместе с маркерами часа и минуты включены во вторую половину строки 19; строка 332 передает код, который указывает час, минуту и секунду, а также источник и статус информации о времени. Первая половина обеих строк занята стабилизированным радиоимпульсом 1 МГц [Kovačević, 1973 и 1977]. Белградское телевидение передает эти сигналы по двум своим программам в течение всего периода передач студии с 1975 года.

В Соединенном Королевстве строчные и кадровые синхронизирующие сигналы, передаваемые Британской радиовещательной корпорацией в диапазоне 9, как правило, контролируются рубидиевым стандартом. Их уход относительно UTC обычно составляет несколько микросекунд в день, но также существуют обратимые скачки времени, зависящие от программы. Сигналы, передаваемые несколькими телевизионными передатчиками, обслуживающими множество крупных населенных и промышленных центров, проверяются каждые сутки с точностью 0,1 мкс. Измерительная линия шкалы UTC управляется Национальной физической лабораторией (NPL) и передатчиком MSF/GBR, расположенным в Рагби [МККР, 1974—78d].

Были также разработаны несколько методов использования телевизионных передач как высокостабильных эталонов частоты. В ФРГ контроль точности частоты охватывает около 160 телевизионных передатчиков в 82 пунктах, работающих в диапазоне частот 471,24—783,26 МГц. Передаваемая частота дистанционно управляется цезиевым стандартом, который регулируется относительно центральной группы из шести коммерческих высокоточных цезиевых стандартов. Измеренные станции показали среднее нормализованное отклонение частоты, равное 3×10^{-12} . Вычисленная стандартная девиация составляет 3×10^{-11} . Как было установлено, сигналы, принятые на расстоянии от 46 до 125 км от передатчика, в интервале 30 с в худшем случае имеют фазовые флуктуации, соответствующие частотным изменениям порядка 1×10^{-11} .

В ГДР строчной и кадровый синхронизирующие сигналы, переданные по телевизионным каналам, непосредственно контролируются Государственной службой времени и частоты с погрешностью 6 нс и используются для передач частоты по стране и для сличения времени со службами времени соседних стран. Эффект обратимых скачков времени, превышающих 200 нс и обусловленных изменениями времени задержки в каналах телевизионных сетей, может быть устранен путем корректировок, приводящих к снижению неопределенности сравнений времени до менее чем 50 нс [Kalau, 1979].

Во Франции в эксперименте по сличению частот между водородными мазерами двух лабораторий, отстоящих друг от друга на 16 км, телевизионная несущая на частоте 182,25 МГц использовалась как общий эталон. Синтезаторы, управляемые мазерами, были использованы для генерирования биений звуковой частоты в несущей, а фазовые сличения биений осуществлялись через телефонную линию. Была получена разрешающая способность, равная $4 \times 10^{-11} \tau^{-1}$ для $1 \text{ с} < \tau < 300 \text{ с}$ и 6×10^{-14} для $\tau = 1 \text{ ч}$ [Gabry и др. 1977].

В Японии и США была продемонстрирована стабильность частоты, обеспечиваемая телевизионной цветовой поднесущей. Эта высокая стабильность — результат использования телевизионными сетями атомных стандартов частоты для генерирования поднесущих частот.

Были проведены сличения частот между Токио и Мицузавой (Япония) [Saburi и др. 1978]. Цветовая поднесущая была сравнена по фазе с генерированным на месте сигналом цветовой поднесущей. Полученная точность составила $6,5 \times 10^{-12}$, 4×10^{-12} и $2,2 \times 10^{-12}$ для времени усреднения 10, 30 и 60 минут, соответственно.

В 1979 году сравнения частот были проведены Государственным институтом метрологии (NIM) Китайской Народной Республики. Результаты сравнений показали, что при использовании телевизионной цветовой поднесущей на расстоянии 2000 км точность частотной калибровки выше $\pm 5 \times 10^{-12}$ за 30 минут. Подобные результаты были получены также Пекинской и Шаньсийской обсерваториями.

Вполне простой метод, в котором непосредственно используется сигнал цветовой поднесущей, был апробирован в Шанхайской обсерватории. Точность частотной калибровки составляет примерно от 1 до 2×10^{-11} за 15 минут.

С 1981 года NIM Китайской Народной Республики использует цезиевые часы для контроля цветовой поднесущей и для включения стандартного радиоимпульса 1 МГц (20 периодов), секундных сигналов и кода времени в строки 16 и 329 сигнала Китайского центрального телевидения (CCTV). Этот стандарт частоты и сигнал точного времени официально используются с 1984 года. Сличения времени показали, что при использовании этого метода для синхронизации секундных сигналов неопределенность составляет менее 30 нс на расстояниях в пределах прямой видимости.

Основываясь на полученных ранее результатах высокой долговременной стабильности передач телевизионной цветовой поднесущей 3,58 МГц, осуществляемых основными телевизионными сетями США [Davis и др., 1971], Национальное бюро стандартов (NBS) недавно ввело усовершенствованную службу частотной калибровки в национальном масштабе. Пользователь, находящийся практически в любом месте США, сейчас может легко и при небольших затратах калибровать свой генератор с точностью до нескольких долей на 10^{11} за 15 минут по первичному стандарту частоты в NBS. Эта точность стала возможной из-за высокой стабильности сетевых атомных стандартов частоты, генерирующих сигналы поднесущей, и из-за наличия регулярных измерений NBS поднесущих частот.

Прежде всего пользователь должен измерить разницу частот между своим генератором и одной из основных поднесущих телевизионной сети в течение интервала, когда он принимает прямую программу сети. Необходимый телевизионный сигнал поднесущей можно легко получить из несколько модифицированного цветного телевизионного приемника. В NBS были разработаны и изготовлены несколько вариантов подходящего оборудования для пользователей [Davis, 1975]. В простейшем варианте, называемом компаратором с цветовыми полосами, измерения осуществляются ручной синхронизацией периода, требуемого для того, чтобы цветовая полоса на телевизионном экране прошла изменяющую цвета последовательность.

В более сложном варианте оборудования для пользователей разница частот между местным генератором и поднесущей сети автоматически измеряется, вычисляется и выводится непосредственно на телевизионный экран в долях на 10^{11} . Полностью автоматическое измерение требует около 15 минут и обеспечивает погрешность около 1×10^{-11} .

Национальное бюро стандартов также разработало относительно недорогую, универсальную систему регистрации данных с использованием микропроцессора, которая автоматизировала как процесс сличения с помощью синхросигнала строки 10, так и измерения цветовой поднесущей. По данным, полученным из нескольких удаленных пунктов на территории США, типовые величины погрешности составляют 10 нс при сличении времени и 1×10^{-12} при сличении частоты (усреднение за сутки) [Davis, 1976].

Одна из этих основных сетей в США сейчас использует цезиевые стандарты для генерирования цветowych поднесущих частот 3,58 МГц, которые затем распределяются по всей стране. Цезиевый стандарт фактически устраняет любой долговременный сдвиг в поднесущей частоте.

ССЫЛКИ

- ALLAN, D.W., BLAIR, B.E., DAVIS, D.D. and MACHLAN, H.E. [April 1972] Precision and accuracy of remote synchronization via network television broadcasts, LORAN-C, and portable clocks. *Metrologia*, Vol. 8, 64—72.
- ALLAN, D.W., LESCHIUTTA, S. and ROVERA, G. [1970] TV frame pulses used for precision time synchronization and their noise distribution. *Alta Frequenza*, Vol. XXXIX, 452.
- BECKER, G. and ENSLIN, H. [1972] Genaue Zeit- und Frequenzvergleiche mittels Fernsehbildimpulsen (Precise time and frequency comparison by television synchronization pulses). *Frequenz*, Vol. 26, 332.
- БОРИСОЧКИН В.В. и ФЕДОТОВ Ю.А. [1982] Передачи частотно-временных сигналов через ТВ систему. *Измерительная техника*, 2.
- DAVIS, D.D. [20 March 1975] Calibrating oscillators with TV colour-reference signals. *Electronics*, Vol. 48, 107—114.
- DAVIS, D.D. [December 1976] A microprocessor data logging system for utilizing TV as a time-frequency transfer standard. Proc. 8th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, (US Naval Research Laboratory, Washington, DC) 167—183.
- DAVIS, D.D., BLAIR, B.E. and BARNABA, J.F. [August 1971] Long-term continental US timing system via television networks. *IEEE Spectrum*, Vol. 8, 41—52.
- DAVIS, D.D., JESPERSEN, J.L. and KAMAS, G. [June 1970] The use of television signals from time and frequency dissemination. *Proc. IEEE (Lett.)*, Vol. 58, 931—933.
- GABRY, A., FAUCHERON, G., DUBOIS, B. (CNET) and PETIT, P. (CNRS) [1—3 June 1977] Distant comparison of stable frequency standards by means of the transmission of a beat note between the carrier of a TV broadcast signal and a frequency synthesized from the frequency standards. Proc. 31st Annual Symposium on Frequency Control, Atlantic City, NJ. USA (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703) (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).
- HOWE, D.A. [August 1972] Nationwide precise time and frequency distribution utilizing an active code within network television broadcasts. *IEEE Trans. Instr. and Meas.*, Vol. IM-21, 263—276.
- INOUE, T. and NARA, M. [April 1978] The stability of time comparison by TV signal of common emission. *Bull. Nat. Res. Lab. Metrology*, 36.
- KALAU, M. [1979] Experiences with time comparisons by the TV method. Proc. 10th International Congress of Chronometry, Geneva, Vol. 2, 83—89.

- KOVAČEVIĆ, Z.B. [1973] The first experimental results of time and frequency dissemination via TV network. JUKEM, Proceedings, XXV/13, Belgrade (на сербохорватском языке).
- KOVAČEVIĆ, Z.B. [1977] New possibilities for time and standard frequency dissemination over TV networks. Proc. 9th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Greenbelt, Md., USA.
- LAVANCEAU, J.D. and CARROLL, D. [1971] Real time synchronization via passive television transmission. Proc. 3rd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Strategic Planning Meeting, 331—366.
- PARCELIER, P. [23 January 1976] Comparaison d'horloges atomiques par réception de signaux de télévision. *Bull. d'Information du Bureau Nat. de Métrologie*, 23, 32—39.
- PARCELIER, P. and FRÉON, G. [3—7 October 1977] Utilisation de la télévision dans la métrologie temps-fréquence. Actes du Colloque international sur la mesure en télécommunications organisé par l'URSI. Lannion, France.
- ROVERA, G. [1972] On the accuracy of the TV timing method. *Alta Frequenza*, 41, 822—824.
- SABURI, Y., YASUDA, Y., KOBAYASHI, S. and SATO, T. [1978] Precision comparison of time and frequency by means of TV signals. *Rev. Radio Res. Labs. (Japan)*, Vol. 18, 433—444.
- TOLMAN, J., PTACEK, V., SOUCEK, A. and STECHER, R. [December 1967] Microsecond clock comparison by means of TV synchronizing pulses. *IEEE Trans. Instr. and Meas.*, Vol. IM-16, 3, 247—254.

Документы МККР

- [1974—78]: а. 7/137 (Китайская Народная Республика); б. 7/6 (Япония); с. 7/125 (Швейцария); д. 7/106 (Соединенное Королевство).
-

ОТЧЕТ 1017

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАДЕРЖКИ СИГНАЛОВ В АНТЕННАХ

(Вопрос 9/7)

(1986)

1. Введение

По мере того как становятся возможными передачи времени с большей разрешающей способностью за счет использования усовершенствованных генераторов времени и частоты с более высокой кратковременной стабильностью, преобладающими источниками помех могут стать средства калибровки и измерения задержек в цепях между сравниваемыми стандартами. В задержки в цепях между сравниваемыми стандартами включаются задержки в антеннах, используемых для излучения и приема электромагнитных волн, распространяющихся по трассе, разделяющей генераторы точного времени. Настоящий Отчет рассматривает выполненную в данной области работу, отраженную в опубликованной литературе, и является первой попыткой представить современный уровень развития техники в этой области. Поскольку средства выполнения таких калибровок не стандартизированы различными администрациями, целесообразно представить на рассмотрение основные принципы, которые могут привести к принятию приемлемых процедур для проведения измерений.

2. Основные положения

В настоящее время существуют генераторы сигналов времени, обладающие потенциальными возможностями для формирования шкал времени с девиациями менее 1 нс в течение интервалов времени от нескольких часов до нескольких суток. Задержки сигналов в электронной аппаратуре [электронных схемах] могут быть измерены и прокалиброваны в лабораторных условиях на уровне нескольких сот фемтосекунд (фс). Может быть измерена чувствительность этой аппаратуры к изменениям окружающей среды, таким как температура, магнитные поля и ускорение, и предусмотрены меры для обнаружения, компенсации или учета этих возмущающих эффектов. Антенны могут рассматриваться как разновидности последовательно соединенных электрических цепей. Однако для их измерений и калибровки им может потребоваться более сложная аппаратура.

Большим антеннам, используемым для передачи сигналов Logan-C, требуется 60 или более микросекунд на формирование радиоимпульсов [полей излучения] с несущей 100 кГц [Fujimoto и Fujiwara, 1981]. Аналогичным образом небольшие индуктивные рамочные антенны, используемые для приема этих сигналов, имеют задержки, связанные с переходным процессом формирования принятого сигнала. На формирование сигналов, аналогичных тем, что используются в системе Omega, работающей на 11—15 кГц, требуются десятки миллисекунд [Watt, 1967].

На антеннах, используемых на спутниках для передачи сигналов на частотах 150 и 400 МГц, задержки составляют примерно 25—50 нс. Поскольку эти задержки зависят от таких факторов, как ширина полосы, частота несущей, физическая длина и направленность антенны, сигналы времени, полученные из общей шкалы времени, могут иметь временные сдвиги или задержки, которые являются основной причиной ошибок при передачах сигналов времени.

3. Измерения

Проводятся эксперименты по измерению задержек сигнала антенны методом замещения. Выбирается отрезок кабеля, сравнимый по эквивалентной длине с расстоянием излучения поля в дальней зоне, $2D^2/\lambda$, для небольших электрических антенн, и определяется полная фазовая задержка. Кабель разделяется на две секции: одна секция подает сигнал к одной антенне, а другая принимает сигнал от второй идентичной антенны. В этой комбинации определяется полная фазовая задержка. Разность между измерениями двух задержек, за вычетом вычисляемой задержки распространения в воздушной диэлектрической среде между центрами фаз антенн, представляет удвоенную задержку одиночной антенны.

В случае антенны с очень большой апертурой не всегда возможно иметь две почти идентичные антенны, достаточно разнесенные для проведения вышеуказанного измерения. В этом случае можно измерить задержку между двумя небольшими почти идентичными антеннами, а результат сравнить с задержкой, полученной, когда одна из небольших антенн заменена большой антенной. Такого вида измерения были проведены в Лаборатории реактивного движения (Пасадена, Калифорния) [Otoshi, 1975; Cha и др., 1978; Otoshi и др., 1985].

В экспериментах с космическими зондами были измерены небольшие изменения в задержке СВЧ сигналов для получения данных по планетарным атмосферам и распределению газообразного вещества в космосе. Эта работа привела к исследованиям влияния аномалий на групповую задержку в СВЧ линиях передач [Beatty и Otoshi, 1975], а также способствовала разработке комплекта стандартов групповых задержек [Otoshi и Beatty, 1976] на 15, 30 и 60 нс. Эти стандарты задержек были калиброваны на частотах 2113, 2295 и 8415 МГц с погрешностью $\pm 0,1$ нс.

4. Выводы

Для антенн, используемых при передачах сигналов точного времени, калибровка задержки сигнала представляет новый параметр или характеристику, которые обычно не указываются в технических условиях и не рассчитываются разработчиками проекта. До настоящего времени экспериментаторы выполнили ряд измерений методом замещения, с тем чтобы эмпирически определить величину задержки антенны, но не представили ни установленного формата, ни общего набора данных по радиочастотному спектру. Группы антенн, используемые для измерений напряженности поля, достаточно разработаны и представляют собой совокупность конструкций антенн, легко адаптируемых для стандартизации этого параметра.

ССЫЛКИ

- BEATTY, R.W. and OTOSHI, T.Y. [November 1975] Effect of discontinuities on the group delay of a microwave transmission line. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. MTT-23, 11, 919—923.
- CHA, A.G., RUSCH, W.V.T. and OTOSHI, T.Y. [November 1978] Microwave delay characteristics of Cassegrainian antennas. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-26, 6, 860—865.
- FUJIMOTO, M.K. and FUJIWARA, K. [1981] Measurements on phase delay of a Loran-C antenna. *Tokyo Astron. Bull.*, 2nd Series, 265, 3015—3020.
- OTOSHI, T.Y. [November 1975] A collection of articles based on S/X-band experiment zero delay ranging tests. Technical Memorandum 33-747. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, Ca, USA. Also available from the National Technical Information Service (NTIS), Report No. N67-14432, Springfield, VA 22161, USA.
- OTOSHI, T.Y. and BEATTY, R.W. [December 1976] Development and evaluation of a set of group delay standards. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-25, 4, 335—342.
- OTOSHI, T.Y., RUSCH, W.V.T. and YOUNG, L.E. [May 1985] VLBI collimation-tower technique for time-delay studies of a large ground-station communications antenna. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-33, 5, 549—555.
- WATT, A.D. [1967] *VLF Radio Engineering*. Pergamon Press.

ОТЧЕТ 1152

**ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ВЫСОКОСТАБИЛЬНЫХ СИГНАЛОВ В УВЧ-СВЧ ДИАПАЗОНАХ,
ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ СИНХРОНИЗИРОВАННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ**

(Вопрос 10/7)

(1990)

Для целого ряда сфер практического применения требуются источники, демонстрирующие не только высокую стабильность частоты, но и возможности изменять номинальную частоту, формируя сетки стабильных частот в УВЧ-СВЧ диапазонах, в некоторых случаях с быстрым переходом с одной частоты на другую.

Такие источники создаются с использованием различных систем фазовой синхронизации с помощью либо непрерывных, либо импульсных цепей фазовой автоподстройки частоты [Шахгильдян и Ляховкин, 1972; Шахгильдян и Белюстина, 1982; Шахгильдян, 1989].

Потенциальная стабильность сигнала и оптимальная точность частотной стабилизации ограничиваются наличием флуктуационных помех в компонентах системы фазовой синхронизации, особенно в УВЧ-СВЧ диапазонах.

Исследования, целью которых является повышение стабильности частоты, ведутся по двум направлениям:

- улучшение флуктуационных характеристик различных блоков и компонентов, составляющих систему фазовой синхронизации;
- оптимизация структур системы фазовой синхронизации.

Системы фазовой синхронизации, предназначенные для формирования высокостабильных сигналов в УВЧ-СВЧ диапазонах, основаны на использовании двух принципов [Баланов и Кабанов, 1978; Пацюк, 1988]:

- 1) формирование частотной сетки непосредственно в требуемой части диапазона;
- 2) передача частотной сетки, сформированной в низкочастотных диапазонах, в УВЧ-СВЧ диапазоны.

Большинство систем фазовой синхронизации, действующих в вышеупомянутых диапазонах, принадлежат к числу систем многоконтурного типа, которые имеют намного лучшие спектральные характеристики выходного сигнала, чем одноконтурные системы.

Особенности фильтрования многоконтурных систем фазовой синхронизации таковы, что для шумов в стандартном генераторе они эквивалентны фильтру низких частот, для шумов в генераторах с подстройкой в последней петле — фильтру высоких частот, а для шумов в других генераторах — полосовому фильтру. Путем выбора соответствующих параметров для систем фазовой синхронизации можно «экстрагировать» лучшие участки из спектральных характеристик используемого генератора, таким образом минимизируя фазовые шумы выходного сигнала.

Типичные значения уровня спектральной плотности мощности фазовых шумов для источников в УВЧ-СВЧ-КВЧ диапазонах, использующих системы фазовой синхронизации, приведены в таблице I.

Аналогичные значения для источников в КВЧ диапазоне даны в таблице II, которая наглядно показывает увеличение уровня фазовых шумов выходного сигнала для источника с системой фазовой синхронизации по сравнению с сигналом несинхронизированного генератора на лавинно-пролетном диоде и умноженным сигналом кварцевого генератора 10 МГц.

ТАБЛИЦА I

Анализируемая частота	Спектральная плотность мощности фазовых шумов выходного сигнала (дБ/Гц)		
	УВЧ 1 ГГц	СВЧ 10 ГГц	КВЧ 100 ГГц
100 Гц	-80	-70	-60
1 Гц	-90	-90	-70
10 кГц	-100	-90	-75
100 кГц	-120	-110	-90
1 МГц	-150	-130	-80

ТАБЛИЦА II

Анализируемая частота	Спектральная плотность мощности фазовых шумов выходного сигнала (дБ/Гц)		
	Генератор на лавинно-пролетном диоде с системой фазовой синхронизации	Несинхронизированный генератор на лавинно-пролетном диоде	Умноженный сигнал кварцевого генератора
100 Гц	-60	-40	-60
1 кГц	-70	-10	-70
10 кГц	-75	-20	-70
100 кГц	-90	-50	-70
1 МГц	-80	-80	-70

ССЫЛКИ

БАЛАНОВ О.А. и КАБАНОВ А.И. [1987] Принципы построения синтезаторов частоты СВЧ диапазона. *Электросвязь*, 2.

ПАЦЮК А.Д. [1988] Источники высокостабильных колебаний для систем диапазона миллиметровых волн. *Зарубежная радиоэлектроника*, № 11.

ШАХГИЛЬДЯН В.В. (под редакцией) [1989] Системы фазовой синхронизации с элементами дискретизации. *Радио и связь*, 320.

ШАХГИЛЬДЯН В.В. и БЕЛЮСТИНАЯ Л.И. [1982] Системы фазовой синхронизации. *Радио и связь*, 288.

ШАХГИЛЬДЯН В.В. и ЛЯХОВКИН А.А. [1972] Системы фазовой автоподстройки частоты. *Связь*, 447.

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

РАЗДЕЛ 7D: ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКОВ И ФОРМИРОВАНИЕ ШКАЛ ВРЕМЕНИ

ОТЧЕТ 364-6

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРОВ СТАНДАРТНЫХ ЧАСТОТ

(Исследовательская программа 3B/7)

(1966—1970—1974—1978—1982—1986—1990)

1. Введение

В последние годы стали доступны результаты многих исследований, касающихся нестабильности генераторов стандартных частот. Было проведено широкое теоретическое изучение данного вопроса, рассмотрены определения и экспериментальные методики измерений (см. Отчет 580; особенно условные обозначения).

Было установлено [IEEE, 1966; NASA, 1964; Yasuda и Yoshimira, 1964], что тип шумов, возникающих в генераторе стандартных частот, может быть классифицирован в зависимости от распределения создаваемой им спектральной (или фазовой) плотности. Эти спектральные распределения плотности представляют собой преобразования Фурье соответствующих автокорреляционных функций, и для работы с этими функциями был разработан соответствующий математический аппарат. [Blackman и Tukey, 1959; Davenport и Root, 1958]. Так называемый «фликкер-эффект», по которому изменение спектра соответствует закону $1/f$, особенно важен для оценки долговременной работы всех типов стандартов частоты; и по этому аспекту проводились специальные исследования [NBS, 1974]. Было также установлено, что спектральная функция $1/f^2$ имеет большое значение для характеристик генераторов частот [Jones и Tryon, 1983].

Как в атомных стандартах, так и в кварцевых генераторах, тепловые и дробовые шумы вносят вклад в кратковременную нестабильность и, в зависимости от механизма, дают вариации спектральной плотности фазы по закону или f^2 или f^0 . Целевое назначение генератора стандартных частот определяет степень значимости этих эффектов для нестабильности, обусловленной фликкер-шумом и другими частотными отклонениями.

В связи с ростом доступности и все более широким использованием коммерческих атомных стандартов частот для генерирования очень стабильных шкал времени, во многих лабораториях в разных странах мира накоплен большой объем данных о характеристиках стабильности. Один из выводов состоит в том, что коммерческие цезиевые пучковые стандарты частот иногда имеют небольшие, но существенные систематические сдвиги частоты.

Появление этих сдвигов показывает, что флуктуационные явления при таких стандартах не могут быть достаточно полно описаны измерением стабильности $\sigma_y(\tau)$ в соответствии с Колмогоровым [1941], Малаховым [1966] и Алленом [1966]. Некоторые службы времени считают целесообразным при анализе соответствующего программного обеспечения измерять и учитывать эти сдвиги. Другие службы времени используют величину $\sigma_y(\tau)$ для характеристики указанных частотных сдвигов. В частности, это относится к большим периодам времени ($> 0,5$ года). Считается, что сдвиги обусловлены нестационарным режимом некоторых часов на интервалах времени, составляющих значительную часть срока работы часов. Было, однако, установлено, что большинство этих частотных сдвигов может быть представлена как случайная флуктуация процесса частотной модуляции, и $\sigma_y(\tau)$ может быть использована для идентификации зависимости $\tau^{1/2}$ и ее величины [Percival, 1976; Barnes и др., 1982; Jones и Tryon, 1983].

2. Цезиевые пучковые стандарты частоты

В настоящем разделе сообщения о характеристиках различных стандартов сгруппированы по методу, применяемому для создания и анализа сверхтонкой структуры атома цезия. Выбор магнитного состояния производится по традиционной методике, дополненной использованием непрерывно развивающихся оптических методов.

2.1 Выбор магнитного состояния

Систематические сдвиги в коммерческих цезиевых пучковых стандартах частоты исследовались различными лабораториями (PTB [Becker и Hetzel, 1973], МБВ [Guinot, 1974], USNO [Winkler и др., 1970]). Есть данные том, что эти стандарты имеют частотный сдвиг. Подобные сдвиги могут иметь величину от нескольких долей на 10^{14} до нескольких долей на 10^{13} за год (Ежегодные отчеты МБВ). Были разработаны методики [Becker и Hetzel, 1973] периодического контроля и регулировки магнитных полей в этих коммерческих стандартах. Эти методики, по всей видимости, обеспечивают улучшение характеристик стабильности, особенно в течение первых шести месяцев функционирования часов. Кроме того, был разработан метод определения характеристик точности цезиевых пучковых трубок, применимый как для лабораторных стандартов, так и для стандартов коммерческого типа [Hellwig и др., 1973].

Лабораторные первичные цезиевые пучковые стандарты частоты имеются в РТВ, ФРГ [Becker, 1976]; NRC, Канада [Mungall и др., 1976], NIST, США [Wineland и др., 1976]; ВНИИФТРИ, СССР [Ильин и др., 1976], NRLM и CRL, Япония [Nakadan и Koga, 1985; Nakagiri и др., 1984]; NIM, Китайская Народная Республика. Эти стандарты были оценены по большинству параметров, оказывающих влияние на значение выходной частоты, то есть выполнены эксперименты и проведены теоретические исследования, которые дополнили сведения о сдвигах, являющихся причиной отличия значения выходной частоты стандартов от резонансной частоты невозмущенного атомного перехода. Последующий анализ данных показывает, что для всех стандартов вышеперечисленных лабораторий точность по частоте согласуется в пределах 1×10^{-13} . Международные сличения этих приборов с использованием шкалы ТАИ в качестве общего эталона показали совпадение в пределах 3×10^{-13} с полной амплитудой вариаций. Измерения также показали (1976 г.), что значение частоты, используемой для формирования ТАИ оказалось завышенным на 1×10^{-12} по сравнению со значением, взятым при определении секунды. 1 января 1977 года для компенсации этого отклонения была выполнена дискретная корректировка ТАИ на величину 1×10^{-12} . Отклонение было вызвано тем, что МБВ сформировало шкалу ТАИ так, чтобы повысить ее стабильность, с тем чтобы, по возможности, сохранять показания, принятые для ТАИ 1 января 1969 года с использованием ограниченного числа атомных часов. Были выполнены также исследования долговременной стабильности шкалы ТАИ, сформированной с помощью коммерческих цезиевых стандартов и с использованием первичных стандартов в качестве эталона. Измерения РТВ в период 1969—1973 годов показали уменьшение значения частоты в среднем на 1×10^{-13} каждый год [Becker, 1973]. Более поздние измерения показали, что этот уход продолжался и в 1977 году.

В NRC сейчас действуют трое длиннопучковых первичных цезиевых часов. Первые длиннопучковые первичные часы CsV начали работать в мае 1975 года. Оценки точности, выполненные с интервалом 6—12 месяцев, показывают пренебрежимо малые погрешности в шкале времени и дали неизменную погрешность формирования шкалы времени лучше 1×10^{-13} [Mungall и Costain, 1977; Mungall, 1978]. Трое часов с меньшими трубками, CsVI A, B и C, созданные в 1977 и 1978 годах, использовались как вторичные стандарты в течение 1979 года и как первичные — с 1979 по 1988 годы. [Mungall и др., 1980, 1981; Mungall и Costain, 1983]. В 1988 году CsVI был исключен из ансамбля и стал использоваться в экспериментальном режиме. Эти часы имеют предельное значение точности около $1,5 \times 10^{-13}$ и требуют частых оценок точности для поддержания этого предельного значения. Систематические поправки на изменение направления атомов в магнитном поле и разность фаз плеч резонатора оказались менее стабильными, чем у CsV, но переоценка, проводимая по мере необходимости, позволяет поддерживать согласование с Cs лучше 1×10^{-13} . Долговременная частотная нестабильность всех четырех часов приблизительно равна 1×10^{-14} примерно за 24 часа и достигает значений нескольких долей на 10^{15} за периоды от нескольких недель до месяцев. Характеристики работы этих часов начали регулярно сообщаться в МБВ с января 1980 года. С 1985 года было обнаружено снижение стабильности CsV, обусловленное старением некоторых электронных компонентов. Потребовалась замена соответствующих деталей электронной системы для восстановления первоначальной стабильности и точности.

Разница между шкалами ТА(NRC) и ТА(РТВ) остается постоянной в пределах $\pm 1,2$ мкс за период с 1977 по 1983 год. Частоты первичных стандартов NRC CsV и РТВ Cs1, из которых непосредственно выводятся соответствующие шкалы времени, до 1985 года согласовывались в пределах 3×10^{-14} при годичном усреднении. Далее на результаты сравнения шкал времени оказывали влияние упомянутые выше проблемы старения компонентов часов.

Эффект Миллмана в цезиевых пучковых часах был вновь исследован как теоретически, так и экспериментально. Исследования показали, что этот эффект не является существенным для переходов $\Delta m_F = 0$. При использовании таких переходов для определения величины статического магнитного поля в часах суммарная погрешность часов по частоте составляет менее 2×10^{-14} [Vanier и др., 1984].

Был применен новый метод определения функции распределения по скоростям атомов цезия, основанный на изменениях характеристик высоты спектральной линии Рамсея в зависимости от мощности зондирующего радиочастотного сигнала. Этот метод позволяет определять доплеровский сдвиг второго порядка с погрешностью менее 10^{-14} [Boulanger и др., 1984].

Федеральный физико-технический институт (РТВ), ФРТГ, имеет в своем распоряжении два первичных цезиевых пучковых стандарта времени и частоты (Cs1 и Cs2). Cs1 был введен в действие в 1968 году. В это время он включался примерно каждые три месяца для контроля частоты группы атомных часов РТВ, состоявшей из промышленных цезиевых часов. С 1978 года Cs1 находился в постоянной эксплуатации в качестве первичных цезиевых атомных часов; с этого момента шкалы времени РТВ выводятся непосредственно из Cs1. Кроме того, показания этих первичных часов непосредственно участвуют в формировании Международной шкалы атомного времени (TAI) [Becker, 1979]. После проверочной стадии в течение одного года Cs2 с 1985 года находится в постоянной эксплуатации. Соответствующие физические параметры и характеристики Cs2 подобны стандарту Cs1. Однако, в отличие от Cs1, Cs2 является прибором с двунаправленным пучком. Оценка относительной погрешности по частоте для Cs1 дает величину $1 - \sigma$, равную 3×10^{-14} [Dorenwendt, 1986]. Соответствующее значение для Cs2 равно $1,5 \times 10^{-14}$ [Bauch, 1988]. Относительная разность по частоте между Cs2 и Cs1, определенная из 700 суточных значений, составила $2,5 \times 10^{-14}$, что лежит в пределах погрешности обоих часов.

На рис. 1 впервые дается величина двухвыборочной стандартной девиации частоты двух первичных атомных часов РТВ (Cs2 и Cs1) по данным, взятым за интервал в 1000 дней.

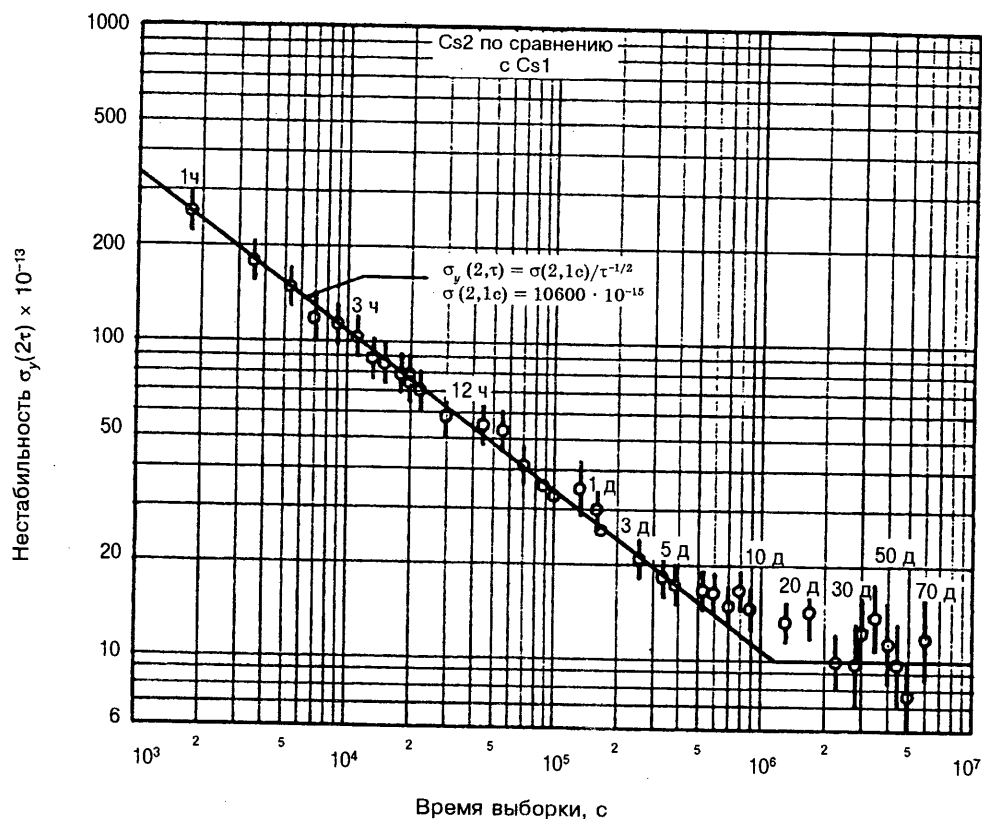


РИСУНОК 1 — Двухвыборочная стандартная девиация Cs2 по сравнению с Cs1 (РТВ)

Национальный институт стандартов и технологии (NIST) (ранее Национальное бюро стандартов), США, с 1960 года использует серию первичных цезиевых стандартов лабораторного типа для создания первичного базисного репера частоты. Используемые в настоящее время модификации стандартов, названные NBS-6 и NBS-4, имеют области взаимодействия до 3,7 м, реверсивные пучки и другие характеристики, обеспечивающие тщательное переопределение пределов точности на регулярной основе. Измерения на годовом интервале обычно дают погрешность менее 1×10^{-13} . Последние оценки (июль 1987г.) NBS-6 дали погрешность 2×10^{-13} , что с использованием алгоритма обработки NIST обеспечивает погрешность хранения размера единицы секунды в системе СИ около 1×10^{-13} .

В период с 1977 по 1980 год в Государственном институте метрологии (NIM), Китайская Народная Республика, два цезиевых первичных стандарта лабораторного типа, CsII и CsIII (область взаимодействия 3,8 м, реверсивные пучки), переопределялись и измерялись несколько раз. Суммарные погрешности (среднеквадратическое значение) оказались равными, соответственно, $4,1$ и $4,5 \times 10^{-13}$, но из-за некоторых ограничений по условиям эксплуатации решено считать, что погрешность стандарта CsII составляет 8×10^{-13} . После модернизации CsIII его точность была переопределена до $2,5 \times 10^{-13}$.

Эталон времени и частоты СССР имеет два цезиевых первичных стандарта (MTs-1 и MTs-2) с длиной области взаимодействия 63 и 100 см, соответственно. MTs-1 работает с 1975 года [Ильин и др., 1976], а MTs-2 — с 1980 года [Абашев и др., 1980]. Модернизация этих стандартов обеспечила погрешность по частоте $1,5 \times 10^{-13}$ для MTs-1 и 1×10^{-13} для MTs-2. Разность воспроизведения действительного значения частоты двух стандартов равна $1,5 \times 10^{-13}$ [Елкин и др., 1983].

Цезиевый пучковый стандарт лабораторного типа NRLM (Япония) действует с 1976 года. Его точность была определена как $2,2 \times 10^{-13}$ [Nakadan и Koga, 1985]. Во время экспериментов был применен улучшенный метод измерения зеемановского расщепления за счет использования попарно симметричных сигма-переходов (с одним и тем же абсолютным значением квантового числа) [Koga, 1984]. Цезиевый пучковый стандарт CRL лабораторного типа CsI имел шестиполосную магнитную фокусирующую систему и 55 см резонатор Рамсея с коаксиально-волноводным переходом внутри магнитного экрана [Kobayashi и др., 1978]. Данные переоценки точности сообщались в МБВ. Для повышения точности CsI в CRL тщательно исследовались эффект экранирования магнитного поля [Nakagiri и др., 1987], затягивание частоты между соседними переходами [Nakagiri и др., 1988a], влияние траектории пучка на стабильность частоты и сдвиг частоты, зависящий от СВЧ мощности [Nakagiri и др., 1988b]. Суммарная погрешность стандарта CsI CRL в апреле 1986 года составила [Nakagiri и др., 1988a] $0,7 \times 10^{-13}$.

Анализ показал, что точная регулировка коммерческих цезиевых пучковых стандартов для минимизации зависимости от величины радиочастотного сигнала может повысить стабильность стандарта до долей на 10^{14} [De Marchi, 1988].

Первичный цезиевый пучковый стандарт ASMW был переопределен и работает с 1989 года. Он будет постоянно использоваться с расчетной погрешностью лучше 5×10^{-13} как основа государственной шкалы времени в Германской Демократической Республике [ASMW, 1989].

2.2 Оптические методы

Оптическая накачка используется как метод инверсии состояния атомов в пучке цезиевого стандарта частоты со сверхтонкой структурой. Очевидная привлекательность этого метода состоит в том, что в пучке более чем на порядок увеличивается число атомов с переходом $m_F = 0$; но есть и другие преимущества.

Для реализации этого метода потребовалось создание надежных диодных лазеров с одномодовым режимом работы на длине волны 852 нм и со стабилизированным выходом. Подобный лазер может также служить для создания оптической флюоресценции одного из состояний со сверхтонкой структурой для анализа числа атомов цезиевого пучка, провзаимодействовавших с СВЧ полем. Термин «оптическая накачка в цезиевом пучковом стандарте частоты» применяется как для обозначения инверсии атомов в пучке, так и для детектирования.

Первоначальный экспериментальный стандарт [Arditi и Picqué, 1980] использовал подобный лазер для оптической накачки и детектирования. Его точность составила несколько долей на 10^{11} .

Была проведена теоретическая работа по изучению сдвига СВЧ резонанса, вызванного светом [Brillet, 1981; De Clercq и Cérez, 1983], а также условий эффективного использования сверхтонкой структуры подуровней, созданных оптической накачкой [Avila и др., 1985]. Дальнейшая теоретическая работа [Avila и др., 1987] была посвящена исследованиям различных методов оптической накачки и детектирования в системах с одним, двумя и тремя лазерами. Для двухлазерных систем была обнаружена очень хорошая симметрия линии перехода, при этом практически исчезли другие СВЧ резонансы. Результирующее уменьшение затягивания частоты соседними резонансными переходами позволило уменьшить величину С-поля (внешнего магнитного поля) [Giordano, 1987].

Был достигнут прогресс в стабилизации частоты лазерных диодов, предназначенных для оптической накачки цезиевого пучка. В этом методе в качестве оптической усилительной среды с внешним оптическим резонатором используется полупроводниковый диод [de Labachellerie и Cérez, 1985]. Для частоты перехода 9,2 ГГц измеренное отношение сигнал/шум составило в 10^4 в полосе частот 1 Гц [Giordano и др., 1988]. Измеренная стабильность экспериментального стандарта с 25 см СВЧ резонатором для времени выборки τ 1 — 10^3 с равна $2 \times 10^{-12}/\sqrt{\tau}$ [Candelier и др., 1988].

В NRLM был разработан стандарт частоты лабораторного типа с оптической накачкой [Oshima и др., 1988a] и были проведены некоторые эксперименты с использованием двух лазеров ($F = 4$ для $F' = 4$, σ -переходы для оптической накачки и $F = 4$ для $F' = 5$, π -переходы для детектирования). Линия каждого лазера была сужена за счет оптической обратной связи с внешним резонатором Фабри—Перо. Измеренное отношение сигнал/шум составило 6500 в полосе 1 Гц. Это, в основном, ограниченная дробовым шумом пучка характеристика, полученная при отношении сигнал/фон, равном единице. Для этого уровня шума при измеренной добротности линии Q , равной 1×10^8 ожидаемая величина кратковременной стабильности стандарта составляет $\sigma_y(\tau) = 3 \times 10^{-13}/\sqrt{\tau}$ (τ — в секундах) [Oshima и др., 1988b]. Расчеты путем сравнения с коммерческими атомными часами показали, что действительное значение кратковременной стабильности, реализованное этой системой, составляет $1,1 \times 10^{-12}/\sqrt{\tau}$ [Oshima и др., 1989a]. Распределение скоростей атомного пучка стандарта с оптической накачкой было измерено методом импульсного возбуждения; этот метод оказался нечувствительным к мощности лазера, когда она превышает несколько милливатт [Nakadan и др., 1988]. Были также измерены зависимости сдвигов от мощности СВЧ для обоих направлений пучка; они согласовывались с теоретическими прогнозами в пределах стандартной девиации 6×10^{-14} [Oshima и др., 1989b].

3. Водородные стандарты частоты

Для времени усреднения порядка 10^5 с характеристики действующих мазеров значительно лучше характеристик цезиевых стандартов. Пассивный мазер может обеспечить лучшие характеристики по стабильности, чем аппаратура цезиевого стандарта для времени усреднения от 1000 до 100 000 с [Walls и Persson, 1984]. Водородные мазеры не являются первичными стандартами из-за неконтролируемого стеночного сдвига [Vanier и др., 1975; Vanier и Larouche, 1978].

Для увеличения точности лазера в ряде лабораторий была проведена работа по снижению или измерению стеночного сдвига. Значение частоты мазеров в службе NRC, измеренное по шкале TAI, уменьшилось с 1971 года; более точные измерения, проведенные в период с 1975 по 1979 год, показали изменение около 4×10^{-13} за год с суммарным значением изменения за весь период $1,7 \times 10^{-12}$ [Morris, 1978]. Однако этот эффект был подтвержден не всеми лабораториями. В число изученных вариантов входило использование накопительной колбы с изменяющимся объемом [Brenner, 1969 и 1970; Debely, 1970; Uzgiris и Ramsey, 1970; Reinhardt, 1973; Vanier и др., 1975; Vessot и др., 1971]; подбор такой температуры, чтобы стеночный сдвиг был близок к нулю (примерно 100°C) [Vessot и др., 1971; Zitzewitz и Ramsey, 1971; Vessot и Levine, 1970]. Обнаружение аномального спин-обменного уширения и сдвига частоты из-за неоднородности статического магнитного поля [Crampton и Wang, 1974] и разработка методов корректировки этих сдвигов [Crampton и Wang, 1974; Reinhardt и Peters, 1975] позволяют надеяться на достижение уровня нестабильности 1×10^{-14} . Были детально исследованы метрологические характеристики двух водородных мазеров [Petit и др., 1974]. Относительная частотная нестабильность 3×10^{-13} была получена при $\tau \approx 10^3$ и 2×10^{-14} — при $\tau = 5$ суткам [Petit и др., 1975]. Исследовалось уменьшение уширения из-за столкновений за счет использования материала FER 120 при около 90°C в качестве покрытия накопительной колбы [Petit и др., 1975]. Теоретическая оценка спин-обменного частотного уширения была подтверждена экспериментально [Desainfuscien и др., 1975]. С учетом этого определяется остаточный частотный сдвиг, открытый Крэмптоном и др., [1976]. Нестабильность около 6×10^{-13} была получена на водородном лазере, имеющем накопительную колбу с внутренней тефлоновой перегородкой [Petit и др., 1980].

Затягивание частоты резонатором может быть главным источником долговременной нестабильности (1 сутки и более) водородных мазеров. Были разработаны регулируемые схемы резонатора, которые используются для активных мазеров [Peters и др., 1968; Vessot и Levine, 1970] и для пассивных мазеров [Hellwig и Bell, 1972; Walls и Hellwig, 1976]. Пары мазеров со взаимной автоподстройкой могут обеспечивать нестабильности от 1 до 2×10^{-14} за 7 суток [Petit и др., 1975; Morris и Nakagiri, 1976]. Долговременная стабильность может быть улучшена за счет применения системы автоподстройки резонатора: было получено значение 3×10^{-15} для времени усреднения 3×10^4 с [Yahyauey и др., 1987] без уменьшения кратковременной стабильности; о подобных характеристиках уже сообщалось ранее [Peters, 1984].

Характеристики хранения времени малогабаритным пассивным водородным лазером, разработанным NBS [Walls и Hellwig, 1976], были оценены по шкале UTC(NBS). Измерения дали погрешность хранения времени около 1,2 нс/сутки и долговременную стабильность (по сравнению со стандартом CsV NRC) около 2×10^{-15} при $\tau = 8$ суткам [Walls, 1987; Weiss и Allan, 1987].

Измеренная частотная нестабильность малогабаритного пассивного лазера составила величину $\sigma_y(\tau) = 1,4 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$ (τ в секундах) за одни сутки и $5 \times 10^{-15} \tau^{-1/2}$ за 16 суток с использованием 64-суточного ряда непрерывных данных. Измеренный уход частоты относительно группы цезиевых стандартов NBS оказался равным нулю в пределах погрешности $\pm 3 \times 10^{-16}$ /сутки. При этом явного фликкер-эффекта не обнаружено [Walls и Persson, 1984]. Предварительные исследования характеристик стабильности показали большие возможности использования лазера в качестве образцовых часов. Малогабаритный пассивный водородный мазер в настоящее время участвует в формировании шкалы времени NIST. Эта работа показала, что стеночный сдвиг является постоянным в пределах погрешности 3×10^{-16} за сутки (64-суточный ряд измерений) и что уход резонатора контролируется на этом же уровне.

Были экспериментально проанализированы амплитудные шумы водородных и рубидиевых мазеров [Lesage и др., 1980]. Определена предельная стабильность пассивных водородных мазеров, которая в основном зависит от степени подавления амплитудных шумов [Lesage и др., 1979]. Было теоретически и экспериментально изучено влияние петли обратной связи и параметра качества резонатора на стабильность частоты водородного лазера [Tetu и др., 1981]. Исследования показали, что стабильность частоты активного малогабаритного водородного лазера должна быть несколько лучше, чем у пассивных мазеров [Audoin и др., 1981].

Программа предварительной оценки [NASA, 1983] характеристик мазеров двух различных типов была завершена под руководством НАСА в Лаборатории реактивного движения. Чувствительность мазеров по магнитному полю была измерена в пределах $(8-30) \times 10^{-10}/\text{T}$, по температуре — в пределах $(7,5-15) \times 10^{-15}/\text{K}$ и по давлению — в пределах $(1,5-3) \times 10^{-15}/\text{кПа}$. Нестабильность частоты составила 2×10^{-14} за 10 с, $(9-21) \times 10^{-16}$ за 4000 с и $(7-8) \times 10^{-15}$ за 10^6 с. Уход частоты мазеров находился в пределах $(5-10) \times 10^{-15}$ за сутки. Позднее предоставленные USNO мазеры VLG-11 с использованием улучшенных методов оптической обработки узлов резонаторов дали величину ухода менее $2,5 \times 10^{-15}/\text{сутки}$ [Vessot и др., 1984].

Более поздние испытания NR мазера НАСА в Лаборатории прикладной физики Университета Джонса Хопкинса дали величину нестабильности 4×10^{-15} за 10^6 с. Скорость ухода была постоянной на годичном интервале с погрешностью $\pm 5 \times 10^{-16}/\text{сутки}$ [Rueger, 1981].

Целью работы над водородными мазерами в СССР было увеличение долговременной стабильности (до 1×10^{-14}) и надежности. За счет инверсии плотности заселенности зеемановских подуровней атомов, влетающих в колбу [Жесткова и Елкин, 1979] частотный сдвиг, обусловленный неоднородностью постоянного магнитного поля в колбе, был снижен до величины $1-3 \times 10^{-14}$ [Елкин и др., 1980]. Определение сдвига в частоте настраиваемого мазера из-за спин-обменного взаимодействия [Елкин и Жесткова, 1979] показало, что для дальнейшего улучшения долговременной стабильности водородного мазера требуется точный контроль стабильности времени релаксации излучающих атомов в колбе. Более серьезным препятствием для дальнейшего увеличения стабильности при больших временах усреднения является изменение частоты в водородном мазере, обусловленное изменениями в стеночном сдвиге. Изменение частоты непрерывно настраиваемого водородного мазера на 1×10^{-14} за месяц является довольно типичным явлением [Гайгерер и др., 1982] и может быть обусловлено различными причинами, относящимися к старению покрытия колбы, включая кристаллизацию или загрязнение. Исследования по улучшению воспроизводимости стеночного сдвига развиваются по двум направлениям: использование гибкой накопительной колбы с выбором температурного режима, обеспечивающего нулевой сдвиг, и поиск новых материалов для покрытия колб [Демидов и др., 1978]. В настоящее время водородные стандарты частоты являются основными средствами воспроизведения и хранения Государственной шкалы времени первичного эталона и вторичных эталонов времени и частоты в СССР.

В Исследовательской лаборатории по радио, RRL, (в настоящее время — Научно-исследовательская лаборатория связи, CRL), Япония, работа над водородными мазерами началась с 1966 года [Saburi и др., 1974; Ohta и др., 1974]. Характеристики указанных мазеров были улучшены методом сортировки по одному состоянию (метод Майорана). Для этого были использованы реверсивное магнитное поле и двойная фокусировка, что позволило устранить около 90% неактивных атомов в зеемановских подуровнях и уменьшить частотный сдвиг из-за неоднородности магнитного поля до примерно одной десятой сдвига, получаемого при сортировке стандартным методом [Urabe и др., 1984]. Работа над мазерами с автоподстройкой продолжается с целью использования их в качестве образцовых часов. RRL также разработала два водородных мазера [Morisawa и др., 1984], пригодных для работы в этом поле и для использования в качестве стандарта времени и частоты на радиотелескопе K-3, созданном RRL и НАСА для совместных радиоинтерферометрических экспериментов [Группа исследований и разработки по VLBI, RRL, 1984]. Измеренная стабильность частоты равна $2,4 \times 10^{-15}$ для интервала выборки 830 с и $1,4 \times 10^{-14}$ — для 10^5 с. Чувствительность к комнатной температуре составила около $2,3 \times 10^{-14}/\text{K}$, а чувствительность к внешнему магнитному полю — $2,5 \times 10^{-9}/\text{T}$, что вполне приемлемо для величины обычных геомагнитных полей. Однако на станциях VLBI устройства поворота антенны могут вызывать возмущения внешних магнитных полей большей амплитуды; это требует постоянного контроля внешнего статического магнитного поля.

4. Генераторы со сверхпроводящим резонатором

Данные по генераторам со сверхпроводящим резонатором заслуживают, пожалуй, особого внимания, так как эти приборы пока еще не столь широко известны, как другие типы высокостабильных стандартов частоты. Реализация концепции этого генератора дала характеристики по стабильности, превосходящие характеристики всех других известных генераторов [Jiménez и Septier, 1973; Turneare и Stein, 1975]. При особо благоприятных условиях измеренное значение нестабильности частоты составляло 6×10^{-16} за время усреднения сотни секунд [Stein, 1975]. Генераторы со сверхпроводящим резонатором, использующие надежные низкотемпературные криостаты, могут быть легко приспособлены для промышленного выпуска и окажутся наиболее подходящими генераторами для обеспечения стабильности на короткие и средние интервалы времени (время усреднения до тысяч секунд). Такие приборы могут представлять интерес для специализированных применений, например для интерферометрии со сверхдлинной базой или для генерации сигналов СВЧ с высокоспектральными характеристиками. В ранних конструкциях имелась излишняя зависимость от условий внешней среды, что мешало бы их широкому применению, несмотря на прочность и малые габариты; новые разработки обещают значительно уменьшить зависимость от влияния окружающей среды [Dicks и Strayer, 1984].

С 1976 года Исследовательская лаборатория по радио (RRL), в настоящее время известная как CRL (Япония), занимается исследованием генератора с частотой 9,2 ГГц, стабилизированного сверхпроводящим резонатором (SCO). На основе измеренного отношения S/N генератора SCO и добротности резонатора, Q , составляющей $2,9 \times 10^8$, была вычислена нестабильность генератора, составившая $1,1 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$. Однако флуктуация частоты SCO, обусловленная механической деформацией резонатора из-за наклона и вибраций сосуда Дьюара, представляется достаточно значимой. Для частот механических вибраций менее 80 Гц, измеренное отношение чувствительности сверхпроводящего резонатора к ускорению составило $6,5 \times 10^{-8}/g$ [Komiyama, 1985].

5. Приборы с ионными ловушками

На приборе с ловушкой ионов ртути (199_{Hg^+}) была получена нестабильность частоты $\sigma_y(\tau) = 3,6 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$ ($10 \text{ с} < \tau < 3500 \text{ с}$) [Jardino и др., 1980; Jardino и др., 1984; Meis и др., 1988]. С помощью нескольких подобных устройств была получена величина нестабильности $\sigma_y = 1,2 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$ [Cutler и др., 1981; Cutler и др., 1987]. На стандартной ловушке ионов бериллия (9_{Be^+}) с использованием лазерного охлаждения и оптической накачки достигнута стабильность частоты на уровне стабильности коммерческих цезиевых стандартов [Bollinger и др., 1984]. Исследования показали, что основным ограничением этого метода является погрешность из-за эффекта Доплера второго порядка, обусловленного вращением ионного облака, на которое не воздействует охлаждение.

Теоретически и экспериментально исследуется новая концепция стандарта частоты, основанная на «индуцированном охлаждении». При индуцированном охлаждении один тип ионов охлаждается через кулоновское взаимодействие с другим типом ионов, охлажденных лазером. Этот эффект был продемонстрирован при охлаждении ионов Hg^+ посредством лазерного охлаждения ионов Be^+ ; в настоящее время рассматривается возможность использования этого метода для ртутных стандартов частоты. Его преимущество в том, что эти ионы-«часы» могут охлаждаться непрерывно, поскольку переменную составляющую сдвига Штарка от лазерного охлаждения можно снизить до пренебрежимо малой величины.

В ряде лабораторий изучаются оптические стандарты частоты, основанные на одиночных ионах, охлажденных лазером. Для ионов Hg^+ с охлаждением до предела Лэмба—Дикка на длине волны 281 нм [Bergquist и др., 1987] была получена добротность линии $Q > 3 \times 10^{10}$ (ограниченная шириной луча лазера).

6. Другие приборы

Нестабильность частоты в 6×10^{-14} за 128 с была получена в пассивном режиме с кварцевым кристаллом с прижимными электродами [Stein и др., 1978; Besson и Peier, 1980].

В IEN (Национальном электротехническом институте), Италия, несколько лет проводится исследовательская работа по субмиллиметровым пучкам, использующим атомы магния [Strumia, 1972]. Эта работа может привести к созданию первичного стандарта с погрешностью около 10^{-13} [De Marchi и др., 1983]. В IEN ведутся экспериментальные и теоретические исследования с целью оценки характеристик магниевого пучкового стандарта. Использовались, с необходимыми дополнениями, метод Рамсея [Godone и др., 1986; Bava и др., 1987]; частотный переход атомов Mg был измерен с разрешением 20 Гц, что соответствует нестабильности 3×10^{-11} , а стабильность в области белого частотного шума оказалась равной $\sigma_y(2, \tau) = 8 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$ [Godone и др., 1987].

Был проведен анализ эффективности пучковых Mg и Ca стандартов с оценкой отношений сигнал/фон и сигнал/шум на детекторе [Bava и др., 1986]. Детально рассмотрены некоторые источники погрешностей Mg стандарта: зеэмановские поправки [Novero и др., 1988], распределение по скоростям метастабильных атомов [Giusfredi и др., 1988], нестабильность СВЧ источников накачки [Godone и др., 1989a], фазовый сдвиг в плечах резонатора [Bava и др., 1989], смещение частоты из-за теплового излучения [Bava и др., 1983]. Дана оценка суммарной погрешности [Godone и др., 1989b].

7. Характеристики различных приборов

Выбор типа стандарта в качестве оптимального эталона частоты для конкретного применения зависит, по крайней мере частично, от среднего времени измерения. На рис. 2 представлены некоторые данные измерений стабильности как функции среднего времени измерения для нескольких различных типов стандартов частоты — от имеющихся коммерческих до больших первичных стандартов. Систематические уходы частоты, обусловленные старением, на этих графиках не отражены. Из-за отсутствия достаточно документированных долгосрочных данных по большинству этих приборов графики не распространены на большие времена усреднения.

Из рис. 2 видно, что кварцевый генератор имеет лучшую стабильность при времени усреднения менее примерно 0,1 с. Для атомных стандартов в основном используют кварцевый генератор в качестве «маховика», поэтому их характеристики подобны характеристикам кварцевого генератора на достаточно коротких интервалах усреднения, когда управляющий контур не контролирует кварцевый генератор. Точно так же, на средних интервалах, при времени усреднения от 1 с до 10^5 с наилучшую стабильность имеет водородный мазер, а на больших интервалах времени — цезиевый стандарт (если устранен уход частоты). С увеличением стабильности растет и стоимость, поэтому, хотя рубидиевый стандарт с газовой поглощающей ячейкой не является лучшим из квантовых стандартов по стабильности при любом времени усреднения, это приемлемый компромисс между стоимостью, габаритами и характеристиками для различных областей применения [Rovera, 1976; Rovera и Beverini, 1977].

В рис. 3 использованы данные рис. 2 и приведены измеренные характеристики спектральной плотности флуктуации фазы различных стандартов.

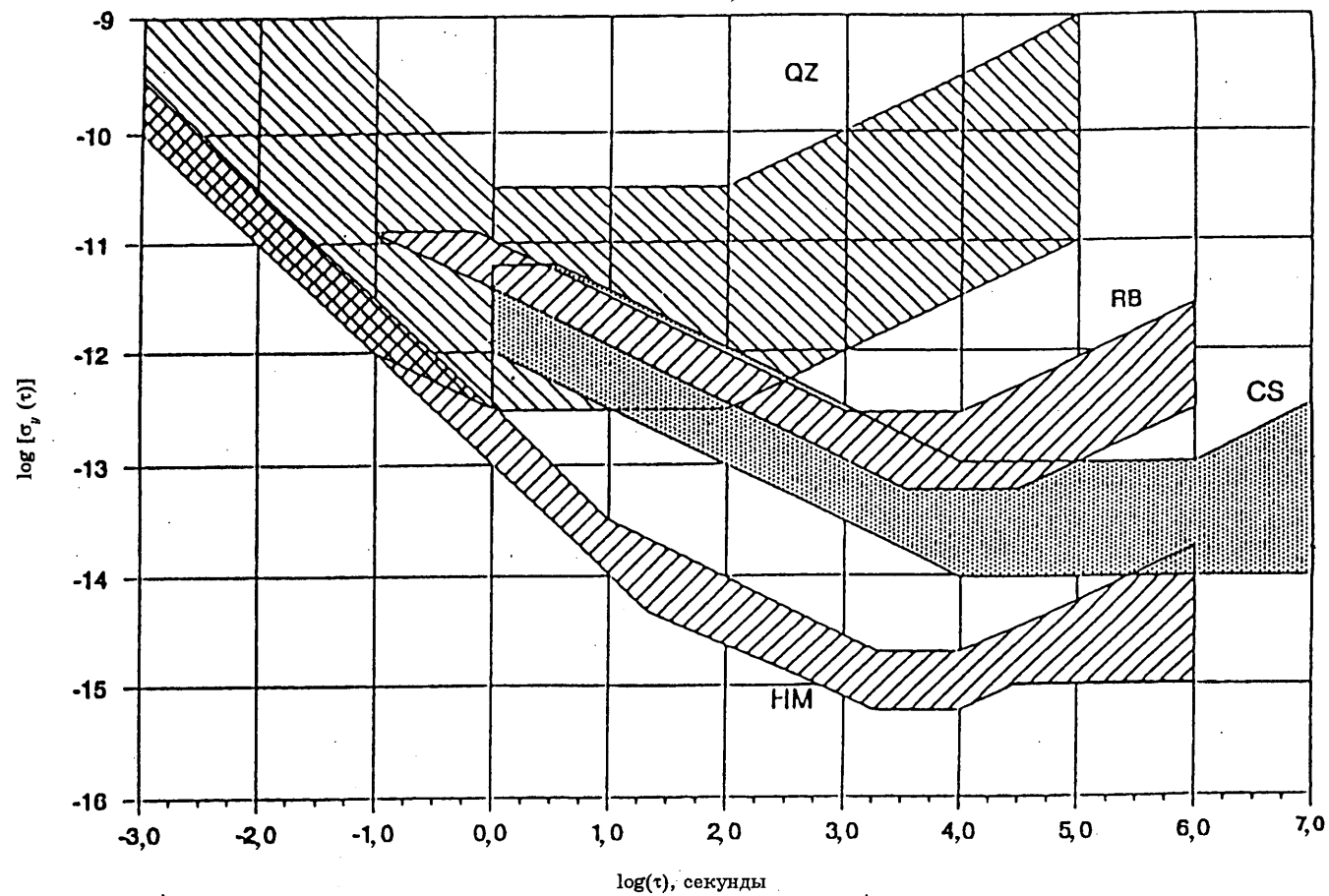


РИСУНОК 2 — Диапазоны стабильности различных стандартов частоты

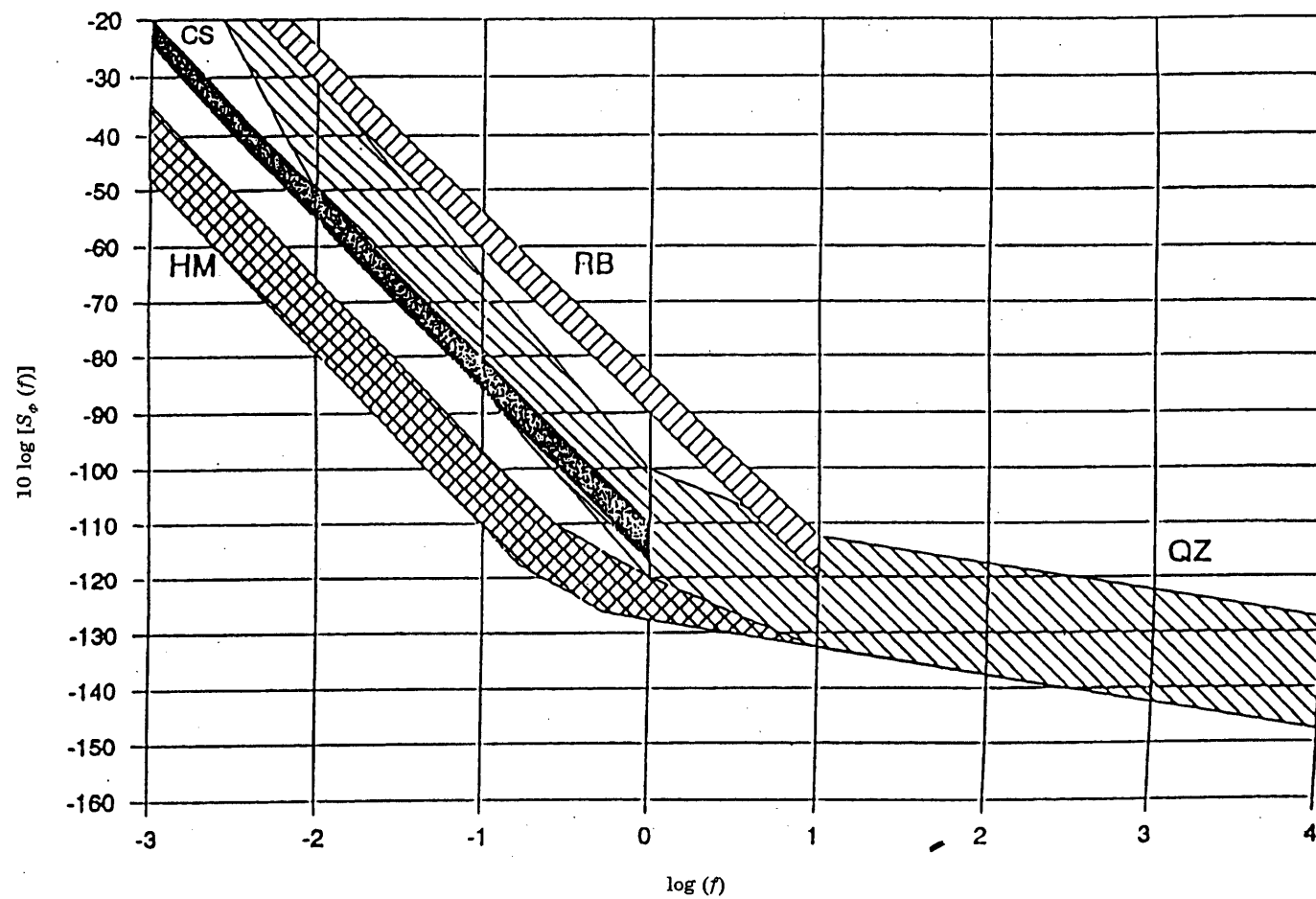


РИСУНОК 3 — Номинальная спектральная плотность мощности фазы для различных стандартов.
Приведено к частоте 5 МГц.

8. Системное применение

Таблица I и рис. 2 служат иллюстрацией того, что при выборе атомных стандартов частоты необходимо тщательно рассматривать технические альтернативы, затраты, габариты и требования к рабочим характеристикам. Для системных применений с использованием точных генераторов необходимо, во-первых, определить требуемую стабильность работы аппаратуры; во-вторых, учесть условия, в которых будет эксплуатироваться стандарт; и, в-третьих, выяснить наличие, уточнить габариты, вес, стоимость и другие характеристики стандарта. Иногда разработчик системы может обнаружить, что стандарта со всеми требуемыми характеристиками на рынке нет. В этом случае разработчик имеет три альтернативы: согласовать параметры своей системы с одним из имеющихся стандартов; выбрать группу таких стандартов, пригодную для осуществления поставленных целей; или же провести научно-исследовательскую программу для разработки требуемого стандарта. Важно осознавать, что часто требования можно удовлетворить путем сочетания имеющихся стандартов. Предположим, например, что система требует очень хорошей долговременной стабильности и включать функцию часов, но требует и высокой частоты спектра, то есть хорошей кратковременной стабильности. При этом нет ограничений по стоимости, весу или габаритам. Для этого случая оптимальным вариантом может быть генератор с кварцевой стабилизацией частоты в группе с цезиевым пучковым или водородным стандартом частоты. Использование такой концепции для решения проблемы разработки весьма эффективно, так как система может быть технически реализована без ущерба для работы отдельных частей. Единственным действительным ограничением может быть физический размер и стоимость. Может случиться, что, поскольку большинство стандартов уже представляет собой сочетание нескольких технологий (например, цезиевый стандарт, равно как и водородный лазер, включает генератор, имеющий кварцевую стабилизацию частоты), незначительное изменение одного из приборов путем использования, например, более высококачественного генератора с кварцевой стабилизацией, и небольшие поправки в константах системного времени могут удовлетворить требования разработки. Необходимо также отметить, что сейчас, когда атомные часы имеются на борту искусственных спутников Земли, приемник частотно-временных сигналов спутника может обеспечить долговременные стабильности, близкие к характеристикам, которые обеспечивают первичные метрологические центры, контролирующие и измеряющие сигналы.

В таблице II даны типичные характеристики восприимчивости различных стандартов частоты к воздействию окружающей среды. Могут оказаться важными и другие виды воздействий окружающей среды. Например, эффект влажности, который был исследован Национальным электротехническим институтом (IEN), Италия; для ансамбля цезиевых часов была замечена зависимость долговременной частотной стабильности от сезонных изменений. Связь между влажностью и частотными изменениями была определена посредством математических и статистических обработок. Было установлено, что относительный коэффициент изменений частоты в зависимости от абсолютной влажности находится в пределах от $+24 \times 10^{-15}/\text{г}^{-1}\text{м}^3$ до $-48 \times 10^{-15}/\text{г}^{-1}\text{м}^3$ и зависит от выбора часов [Bava и др., 1978].

Примечание. — Дополнительную информацию по характеристикам надежности различных стандартов частоты см. в Отчете 898.

ТАБЛИЦА I — Типовые характеристики в контролируемой среде

Стандарт частоты	Погрешность	Стабильность			Объем (дм ³)	Вес прибора (кг)	Потребляемая мощность (Вт)	Наличие на рынке	Ориентировочная цена на 1987 год (в 1000 \$)
		Короткий интервал (100 с)	Нижний уровень	Старение за год					
Кварцевый стандарт частоты	(¹)	от 10 ⁻¹⁰ до 10 ⁻¹³ (²)	от 10 ⁻¹⁰ до 10 ⁻¹³	от 10 ⁻⁶ до 10 ⁻¹⁰	1—10	0,1—10	0,1—20	Да	0,1—10
Водородный мазер (большой)	10 ⁻¹²	2 × 10 ⁻¹⁵	3—20 × 10 ⁻¹⁶	от 10 ⁻¹² до 10 ⁻¹³	1000	250	100	Да	350—450
Водородный мазер (малогабаритный)	10 ⁻¹²	1 × 10 ⁻¹⁴	5 × 10 ⁻¹⁵		100	45	30	Да	200
Цезиевый пучковый стандарт (лабораторный)	1 × 10 ⁻¹³	1 × 10 ⁻¹³	10 ⁻¹⁴	(¹)	2000	500	100	Нет	(³)
Цезиевый пучковый стандарт (⁴) (коммерческий)	2 × 10 ⁻¹²	1 × 10 ⁻¹²	2—5 × 10 ⁻¹⁴	<3 × 10 ⁻¹³	45	30	30	Да	40
Стандарт с рубидиевой ячейкой (высокая точность)	(¹)	7 × 10 ⁻¹³	1 × 10 ⁻¹³	10 ⁻¹⁰	26	15	35	Да	20
¹²⁷ I ₂ стабилизированный лазер (малогабаритный)	2 × 10 ⁻¹⁰	5 × 10 ⁻¹³	10 ⁻¹²	(³)	30	40	50	Нет	40
CH ₄ стабилизированный лазер (малогабаритный)	4 × 10 ⁻¹¹	5 × 10 ⁻¹⁵	5 × 10 ⁻¹⁵	(³)	30	40	50	Нет	150
CO ₂ стабилизированный лазер	10 ⁻¹⁰	1 × 10 ⁻¹²	10 ⁻¹³	(³)	60	100	200	Нет	150

(1) Данная спецификация неприменима.

(2) Стабильность за 1 с.

(3) Не имеется.

(4) Работает с высокой точностью.

ТАБЛИЦА II — Восприимчивость основных стандартов частоты к окружающей среде

Тип стандарта частоты	Температура (°K)	Ускорение (м/с ²)*	Магнитное поле (Т)	Барометрическое давление (Па)	Старение за год
Точный кварцевый, подстраиваемый	10 ⁻¹²	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹²	10 ⁻⁸
Водородный мазер	10 ⁻¹⁴	10 ⁻¹⁴	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹²	10 ⁻¹²
Цезиевый пучковый стандарт	10 ⁻¹⁴	10 ⁻¹⁴	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹³	10 ⁻¹²
Стандарт с рубидиевой ячейкой	10 ⁻¹²	10 ⁻¹³	10 ⁻¹⁴	10 ⁻¹⁶	10 ⁻¹⁰

* Для частот в полосе автоподстройки. За пределами полосы восприимчивость аналогична восприимчивости кварцевого генератора.

Не указаны следующие параметры: ионизирующее излучение, акустические шумы, влажность, термический гистерезис, сопротивление изоляции и напряжение питания.

ССЫЛКИ

- АБАШЕВ Ю.Г., ЕЛКИН Г.А., ПУРТОВ В.И., ФИЛОНОВ Н.Н. [1980] Конструктивные особенности и результаты предварительных исследований цезиевой атомно-лучевой установки МТs-2. Исследования в области измерений времени и частоты. Сборник научных трудов, ВНИИФТРИ, 3—5.
- ALLAN D.W. [February 1966] Statistics of atomic frequency standards. *Proc. IEEE*, Vol. 54, 2, 221—230.
- ARDITI, M. and PICQUE, J.L. [1980] A caesium beam atomic clock using laser optical pumping. Preliminary tests. *J. de Phys. (Lett.)*, Vol. 41, L-381.
- AUDOIN C., VIENNET, J. and LESAGE, P. [1981] Hydrogen maser: active or passive? *J. de Phys.*, Vol. 42, Supplement C-8, 159—170.
- AVILA, G., DE CLERCQ, E., DE LABACHELLERIE, M. and CÉREZ, P. [June 1985] Microwave Ramsey resonances from a laser diode optically pumped cesium resonator. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-34, 2, 139—143.
- AVILA, G., GIORDANO, V., CANDELIER, V., DE CLERCQ, E., THEOBALD, G. and CÉREZ, P. [1987] State selection in a caesium beam by laser diode optical pumping. *Phys. Rev.*, A 36, 3719.
- ASMW [1989] Report of the ASMW (GDR) to the 11th session of the CCDS, Doc. CCDS/89-7.
- BARNES, J.A., JONES, R.H., TRYON, P.V. and ALLAN, D.W. [December 1982] Noise models for atomic clocks. Proc. 14th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA, 295—307.
- BAVA, E., CORDARA, F., PETTITI, V. and TAVELLA, P. [December 1987] Analysis of the seasonal effects on caesium clocks to improve the long-term stability of a time scale. Proceedings 19th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, Redondo Beach, California, 185—202.
- BAVA, E., DE MARCHI, A. and GODONE, A. [September 1983] Blackbody radiation shifts in ground and metastable levels of Mg and Ca. *Lettere al Nuovo Cimento*, Vol. 38, No. 4, 107—110.
- BAVA, E., GODONE, A., GIUSFREDI, G. and NOVERO, C. [1987] The Mg atomic frequency standard. *IEEE J. Quantum Electronics* QE-23, 455—457.
- BAVA, E., GODONE, A. and NOVERO, C. [June 1989] Cavity phase-shift error evaluation in an Mg atomic beam frequency standard. *Applied physics B.*, No. 48.
- BAVA, E., GODONE, A. and RIETTO, G. [1986] Rabi and Ramsey interrogations of metastable beams. *Applied physics B.*, No. 41, 187—196.
- BAUCH, A., DE BOER, H., DORENWENDT, K., FISCHER, B., HEINDORFF, T., HETZEL, P. and SCHRÖDER, R. [1988] Ein aktueller Überblick über die atomuhrenforschung und entwicklung in der PTB. *PTB-Mitt.* 98, No. 1.
- BECKER, G. [1973] Frequenzvergleiche mit dem primären Zeit- und Frequenznormal CS1 der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt zwischen 1969 und 1973. *PTB-Mitt.*, Vol. 83, 319.
- BECKER, G. [December 1976] Recent progress in primary Cs beam frequency standards at the PTB. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-25, 4, 458.
- BECKER, G. [1979] Das Cäsium-, Zeit- und Frequenznormal der PTB als primäre Uhr (The caesium beam time and frequency standard of the PTB as a primary clock). Proc. International Congress of Chronometry, CIC 79-A 1.5.
- BECKER, G. and HETZEL, P. [1973] PTB Jahresbericht 1972 (Annual Report), 124.
- BERGOUIST, J.C., ITANO, W.M. and WINELAND, D.J. [1987] Recoilless optical absorption and Doppler sidebands on a single trapped ion. *Phys. Rev.*, A, Vol. 36, 428.
- BESSON, R. and PEIER, U.R. [1980] Further advances on BVA quartz resonators. Proc. 34th Annual Symposium on Frequency Control, Philadelphia, Pa., USA (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 175 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).

- BLACKMAN, R.B. and TUKEY, J.W. [1959] *The Measurement of Power Spectra*. Dover Publications Inc., New York, NY, USA.
- BOLLINGER, J.J., WINELAND, D.J., ITANO, W.M., BERGQUIST, J.C. and PRESTAGE, J.D., [November 1984] Frequency and time standards based on stored ions. Proc. 16th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting (NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA).
- BOULANGER, J.-S., DOUGLAS, R.J., VANIER, J., MUNGALL, A.G., LI, Y.S. and JACQUES, C. [1984] On the accuracy of cesium beam primary frequency standards. 16th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting (NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA).
- BRENNER, D. [1969] Flexible bulb method of measuring wall shift of the hydrogen laser. *Bull. Amer. Phys. Soc.*, Vol. 14, 943, § 006.
- BRENNER D. [1970] Absolute frequency of the hydrogen maser using a flexible storage bulb. *J. Appl. Phys.*, Vol. 41, 2942.
- BRILLET, A. [1981] Evaluation of light shifts in an optically pumped cesium beam frequency standard. *Metrologia*, 17, 147—150.
- CANDELIER, V., GIORDANO, V., HAMEL, A., THEOBALD, G., CÉREZ, P. and AUDOIN, C. [March 1988] Forum européen temps-fréquence, Neuchâtel, Switzerland (готовится к изданию).
- CRAMPTON, S.B. and WANG, H.T.M. [29—31 May 1974] Density-dependent shifts of hydrogen maser standards. Proc. 28th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 355—361 (Electronic Industries Association, Washington, DC, 20006, USA).
- CRAMPTON, S.B., WANG, H.T.M. and BARRET, J.L. [December 1976] Problems in hydrogen maser design and suggested improvements. Proc. 8th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting (US Naval Research Laboratory, Washington DC), 351—354.
- CUTLER, L.S., GIFFARD, R.P. and McGUIRE, M.D. [December 1981] A trapped mercury 199 ion frequency standard. Proc. 13th Annual Precise Time and Time interval (PPTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA, 563—578.
- CUTLER, L.S., GIFFARD, R.P., WHEELER, P.J. and WINKLER, G.M.R. [May 1987] Initial operational experience with a mercury ion storage frequency standard. Proc. 41st annual symposium of frequency control, 12—19.
- DAVENPORT, W.B. and ROOT, W.L. [1958] *An Introduction to the Theory of Random Signals and Noise*. McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, NY, USA.
- DEBELY, P.E. [1970] Hydrogen masers with deformable bulb. *Rev. Sci. Instr.*, Vol. 41, 1290.
- DE CLERCQ, E. and CÉREZ, P. [1938] Evaluation of the light shifts in a frequency standard based on Raman induced Ramsey resonance. *Optics Comm.*, Vol. 45, 91—94.
- DE LABACHELERIE, M. and CÉREZ, P. [1985] An 850 nm semiconductor laser tunable over a 300 Å range *Optics Com.*, 55, 174—178.
- DE MARCHI, A. [December 1988] A first account of long-term stability results obtained on various caesium standards by the power sensitivity minimization technique. Proc. 20th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC., 45—51.
- DE MARCHI, A., BAVA, E., GODONE, A. and GIUSFREDI, G. [March 1983] Merits and limitations of submillimeter wavelength frequency standards based on a Mg (Ca) metastable beam. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. 1M-32, 1, 191—197.
- ДЕМИДОВ Н.А., ЕЗЛОВ Е.М., ФЕДОРОВ В.А., УЛЬЯНОВ А.А. [1978]. Исследование стеночного сдвига частоты в водородном генераторе для новых материалов. Исследования в области времени и частоты. Сборник трудов, ВНИИФТРИ, 37(67), 81—85.
- DESAINTFUSCIEN, M., VIENNET, J., AUDOIN, C. and VANIER, J. [1975] Temperature dependence of spin exchange frequency shifts in H-H collisions. *J. de Phys. (Lett.)*, Vol. 36, 281—284.
- DICKS, J.G. and STRAYER, D.M. [1984] Development of the super-conducting cavity maser as a stable frequency source. Proc. 38th Annual symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 435 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).
- DORENWENDT, K. [1986] Development and performance of the PTB's CS1 primary clock. *Proc. IEEE*, 74, 137—140.

- ЕЛКИН Г.А., АБАШЕВ Ю.Г., БАРЫШЕВ В.Н., ПУРТОВ В.И. [1983] Цезиевые атомно-лучевые реперы частоты. *Изм. техн.*, 6.
- ЕЛКИН Г.А., ЖЕСТКОВА Н.Д. [1979] Смещение частоты водородного генератора из-за столкновений атомов между собой. *Изм. техн.* 9, 36—37.
- ЕЛКИН Г.А., ЖЕСТКОВА Н.Д., ЯКОВЛЕВ Ю.Н. [1980] Воспроизводимость частоты водородных генераторов на длительных интервалах времени. Исследования в области времени и частоты. Сборник научных трудов, *ВНИИФТРИ*, 6—8.
- ГАЙГЕРОВ Б.А., ЕЛКИНА Л.П., ПУШКИН С.Б. [1985] Исследование метрологических характеристик группы водородных стандартов. *Изм. техн.*, 27—28.
- GIORDANO, V. [May 1987] Caractéristiques du signal d'horloge délivré par un résonateur à jet de césium pompé optiquement par diodes laser, Université Paris-Sud thesis, Orsay.
- GIORDANO, V., HAMEL, A., THEOBALD, G., CÉREZ, P., AUDOIN, C. and CANDELIER, V. [1988] Measurement of the signal-to-noise ratio in an optically pumped caesium beam frequency standard. *Metrologia*, 25, 12—20.
- GODONE, A., BAVA, E., GIUSFREDI, G., NOVERO, C. and WANG YU-ZHU [1986] Observation of the $^{24}\text{Mg } ^3\text{P}_1 - ^3\text{P}_0$ transition via linear Ramsey interrogation. *Optics Communications*, Vol. 59, No. 4, 263—265.
- GODONE, A., BAVA, E. and NOVERO, C. [1987] High resolution frequency measurement of the $^3\text{P}_1 - ^3\text{P}_0$ Mg transition. *Metrologia*, Vol. 24, 133—138.
- GODONE, A., BAVA, E. and NOVERO, C. [June 1989a] Phase-lock of submillimetric backward-wave-oscillators. *IEEE Trans. Instrum. and Meas.* IM-38.
- GODONE, A., BAVA, E. and NOVERO, C. [September 1989b] Mg Beam Frequency Standards, 4th symposium on frequency standards and metrology. Ancona.
- GIUSFREDI, G., GODONE, A., BAVA, E. and NOVERO, C. [1988] Metastable atoms in a Mg beam: excitation dynamics and velocity distributions. *J. of applied physics*, Vol. 63, No. 5, 1279—1285.
- GUINOT, B. [1974] Bureau international de l'heure, Rapport annuel (Годовой отчет МББ).
- HELLWIG, H. and BELL, H. [1972] Some experimental results with an atomic hydrogen storage beam frequency standard. *Metrologia*, Vol. 8, 96—98.
- HELLWIG, H., JARVIS, S., Jr., HALFORD, D. and BELL, H.E. [June 1973] Evaluation and operation of atomic frequency standards using time domain velocity selection modulation. *Metrologia*, Vol. 9, 107—112.
- IEEE [February 1966] Special issue on frequency stability. *Proc. IEEE*, Vol. 54, 2, 101—338.
- ИЛЬИН В.Г., ЕЛКИН Г.А., АБАШЕВ Ю.Г., ПУРТОВ В.И. [1976]. Метрологический цезиевый репер частоты МТС-1. *Изм. техн.*, 10, 43—47.
- JARDINO, M., DESAINTFUSCIEN, M., BARILLET, R., VIENNET, J., PETIT, P. and AUDOIN, C. [1980] Mercury ion frequency standard: preliminary results. Proc. 34th Annual Symposium on Frequency Control, Philadelphia, Pa., USA (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 353 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).
- JARDINO, M., DESAINTFUSCIEN, M., PLUMELLE, F. and DUCHENE, J.L. [1984] Experimental determination of the energy of stored ions from the sidebands in their microwave spectrum. Proceedings 38th annual symposium on frequency control. *IEEE Proc.* 84, CH 2062-8, 431.
- JIMÉNEZ, J.J. and SEPTIER, A. [12—14 June 1973] S and X band superconducting cavity stabilized oscillators. Proc. 27th Annual Symposium on Frequency Control, Philadelphia, Pa., USA, (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 406—413 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).
- JONES, R.H., and TRYON, P.V., [January/February 1983] Estimating time from atomic clocks. *NBS J. Res.*, Vol. 88, 1, 17—24.
- KOBAYASHI, M., NAKAGIRI, K., URABE, S., SHIBUKI, M. and SABURI, Y. [December 1978] Design of and preliminary results on a cesium-beam standard at the Radio Research Laboratories. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-27, 4, 343—348.

- KOGA, Y., [1984] An improved method of measuring the Zeeman shift in cesium beam frequency standards. *Japan J. Appl. Phys.*, Vol. 23, 1, 97—100.
- КОЖИМОГОВ А.Н. [1941] ДАН СССР, том 32, 19. См. также том 30, 299 (1941).
- KOMIYAMA, B. [1985] A 9.2 GHz superconducting cavity stabilized oscillator. Proc. 39th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703) (Electronic Industries Association, Washington, DC 2006, USA).
- LESAGE, P., AUDOIN C. and TETU, M. [1979] Amplitude noise in passively and actively operated masers. Proc. 33rd Annual Symposium on Frequency Control, Atlantic City NJ (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth NJ 07703), 515—535 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).
- LESAGE, P., AUDOIN, C. and TETU, M. [1980] Measurement of the effect of thermal noise on the amplitude of oscillation of a maser oscillator. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-29, 311—315.
- МАЛАХОВ А.Н. [1966]. Спектрально-корреляционные анализы сигналов с неинтегрируемым спектром. *Радиофизика*, том 9, 595.
- MEIS, C., DESAINTFUSCIEN, M. and JARDINO, M. [1988] Analytical calculation of the space charge potential and the temperature of stored ions in an rf quadrupole trap. *Applied physics B* (готовится к изданию).
- MORIKAWA, T., OHTA, Y. and KIUCHI, H. [1984] Development of hydrogen masers for K-3 VLBI system. Proc. 16th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting (NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA).
- MORRIS, D. [December 1978] Time-dependent frequency shifts in the hydrogen maser. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-27, 4, 339—343.
- MORRIS, D. and NAKAGIRI, K. [1976] The frequency stability of a pair of auto-tuned hydrogen masers. *Metrologia*, Vol. 12, 1—6.
- MUNGALL, A.G. [1978] A new concept in atomic time keeping: the continuously operating long-beam primary caesium clock. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-27, 330.
- MUNGALL, A. G. and COSTAIN, C.C. [1977] NRC CsV primary clock performance. *Metrologia*, Vol. 13, 105—107.
- MUNGALL, A.G., and COSTAIN, C.C. [1983] Performance of the four NRC long-beam primary cesium clocks CsV, CsVIA, CsVIB and CsVIC. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-32, 1, 224—227.
- MUNGALL, A.G., DAAMS, H. and BOULANGER, J.-S. [1980] Design and performance of the new 1 m NRC primary cesium clocks. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-29, 4, 291—297.
- MUNGALL, A.G., DAAMS, H. and BOULANGER, J.-S. [1981] Design construction and performance of the NRC CsV1 primary cesium clocks. *Metrologia*, Vol. 17, 123—145.
- MUNGALL, A., DAAMS, H., MORRIS, D. and COSTAIN, C.C. [1976] Performance and operation of the NRC primary caesium clock, CsV. *Metrologia*, Vol. 12, 129—139.
- NAKADAN, Y. and KOGA, Y. [June 1985] Recent progress in Cs beam frequency standards at the NRLM. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-34, 2, 133—135.
- NAKADAN, Y., OHSHIMA, S., IKEGAMI, T. and KOGA, Y. [1988] Velocity distribution measurement of an optically pumped caesium frequency standard at the NRLM. Proc. of the 20th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, 287—294.
- NAKAGIRI, K., OKAZAWA, H., SHIBUKI, M. and URABE, S. [1988b] Beam trajectory in caesium beam primary frequency standard and its influence on frequency stability and shift. *Jpn. J. appl. phys.*, Vol. 27, 12, 2383—2391.
- NAKAGIRI, K., SHIBUKI, M., OKAZAWA, H., AIDA, M. and KOTAKE, M. [September 1988a] Work on primary caesium beam frequency standard at CRL. 4th symposium on freq. stand. and metrol., Ancona, Italy, *Physics Series* by Springer Verlag, 386—388.
- NAKAGIRI, K., SHIBUKI, M., OKAZAWA, H., UMEZU, J., OHTA, Y. and SAITOH, H. [1987] Studies on accurate evaluation of the RRL primary caesium beam frequency standard. *IEEE Trans., Instr. Meas.*, Vol. IM-36, 2, 617—619.

- NAKAGIRI, K., SHIBUKI, M., URABE, S., ISHIZU, M., OHTA, Y., MORIKAWA, T. and SABURI, Y. [1984] Accuracy evaluation of the RRL primary cesium beam frequency standard. Proc. 38th Annual Symposium on Frequency Control, Philadelphia, PA, USA (US Army Electronics command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 447—451 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).
- NASA [1983] Hydrogen maser comparison test — Vol. 1. Executive Summary, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA 91109, USA.
- NBS [1974] NBS Monograph 140: Time and Frequency: Theory and Fundamentals. (Available from Superintendent of Documents, Catalog No. C13.140, Stock No. 0303-01202) US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402, USA.
- NOVERO, C., GODONE, A., BAVA, E. and CAUSA, M. [July 1988] Quadratic Zeeman corrections for metastable levels of Mg and Ca. *Il Nuovo Cimento D*, Vol. 10, No. 7, 841—846.
- OHSHIMA, S., NAKADAN, Y. and KOGA, Y. [1988a] Development of an optically pumped Cs frequency standard at the NRLM. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 37, 409—413.
- OHSHIMA, S., KOGA, Y., NAKADAN, Y., DRULLINGER, R. and HOLLBERG, L. [1988b] The effect of laser line-narrowing on the performance of optically pumped caesium atomic beam frequency standard. Proc. of the 2nd Europ. Freq. Time Forum, 531—534.
- OSHIMA, S., NAKADAN, Y., IKEGAMI, T., KOGA, Y., DRULLINGER, R. and HOLLBERG, L. [1989a] Characteristics of an optically pumped Cs frequency standard at the NRLM. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 38, 533—536.
- OSHIMA, S., NAKADAN, Y., IKEGAMI, T. and KOGA, Y. [December 1989b] A beam reversal experiment for the estimation of microwave power shifts in an optically pumped Cs beam frequency standard; готовится к изданию в *IEEE Trans. Instrum. Meas.*
- OHTA, Y., YOSHIMURA, K., SHIBUKI, M., NAKAGIRI, K., MORIKAWA, T., KOBAYASHI, M. and SABURI, Y. [1974] On an automatic cavity tuner for hydrogen frequency standard. *Rev. Radio Res. Labs.*, Japan, Vol. 20, 39—58.
- PERCIVAL, D.B. [1976] A heuristic model of atomic clock behaviour. Proc. 30th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 414-419 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).
- PETERS, H.E. [1984] Design and Performance of New Hydrogen Masers using Cavity Frequency Switching Servo: Proceedings 38th Annual Symposium on Frequency Control.
- PETERS, H.E., MCGUNIGAL, T.E. and JOHNSON, E.H. [22—24 April 1968] Hydrogen standard work at Goddard Space Flight Center. Proc. 22nd Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 464—493 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).
- PETTIT, P., DESAINTFUSCIEN, M. and AUDOIN, C. [1980] Temperature dependance of the hydrogen maser wall shift in the temperature range 295—395 K. *Metrologia*, Vol. 16, 7.
- PETTIT, P., VIENNET, J., BARILLET, R., DESAINTFUSCIEN, M. and AUDOIN, C. [1974] Development of hydrogen masers as frequency standards at the Laboratoire de l'Horloge Atomique. *Metrologia*, Vol. 10, 61—67.
- PETTIT, P., VIENNET, J., BARILLET, R., DESAINTFUSCIEN, M. and AUDOIN, C. [26—30 May 1975] Etalons de fréquence à hydrogène atomique. Colloque International sur l'Electronique et la Mesure, Paris, France, 111—119.
- REINHARDT, V. [1973] Flexible bulb — large storage box hydrogen maser. Proc. 5th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Planning Meeting (NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA).
- REINHARDT, V. and PETERS, H. [28—30 May 1975] An improved method for measuring the magnetic inhomogeneity shift in hydrogen masers. Proc. 29th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).
- ROVERA, G. and BEVERINI, N. [5—9 September 1977] Frequency stability of the optically pumped passive caesium frequency standard. Proc. EUROMEAS '77, Sussex University, 83.
- ROVERA, G., DE MARCHI, A. and VANIER, J. [1976] The optically pumped passive caesium frequency standard: Basic theory and experimental results on buffer gas frequency shifts. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-25, 3, 203—210.

- RUEGER, L.J., [November 1981] Characteristics of the NASA research hydrogen maser. *J. Inst. Electron. Telecom. Eng.*, Vol. 27, 11, 493—500.
- SABURI, Y., KOBAYASHI, M. and YOSHIMURA, K. [9—11 July 1974] Travaux récents sur le maser à hydrogène aux R.R.L., (Japon). Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (CCDS), 7^e Session. S87-S91. Bureau international des poids et mesures, Sèvres, France.
- STEIN, S.R. [28—30 May 1975] Application of superconductivity to precision oscillators. Proc. 29th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 321—328 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).
- STEIN, S.R., MANNEY, C.M., WALLS, F.L., GRAY, J.E. and BESSON, R. [1978] A system approach to high performance oscillators. Proc. 32nd Annual Symposium on Frequency Control, Atlantic City, NJ, USA (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 527 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).
- STRUMIA, F. [1972] A proposal for a new absolute frequency standard, using a Mg or Ca atomic beam. *Metrologia*, Vol. 8, 85—90.
- TETU M., TREMBLAY P., LESAGE P., PETIT P. and AUDOIN C. [1981] Frequency stability of maser oscillators operated with enhanced cavity Q. Proc. 13th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA, 667—684.
- TURNEAURE, J.P. and STEIN, S.R. [2—6 June 1975] An experimental limit on the time variation of the fine structure constant. Proc. 5th International Conference on Atomic Masses and Fundamental Constants, Paris, France.
- URABE S., OHTA, Y. and SABURI, Y. [1984] Improvement in a hydrogen maser by a new state selection. *IEEE Trans. Inst. Meas.*, Vol. IM-33, 2, 117—121.
- UZGIRIS, C.E. and RAMSEY, N.F. [1970] Multiple-dash hydrogen maser with reduced wall shift. *Phys. Rev. A*, Vol. 1, 429.
- VANIER, J., BOULANGER, J.-S. and MUNGALL, A.G. [1984] The Millman effect in cesium beam atomic frequency standards: further considerations. *Metrologia*, Vol. 20, 101—105.
- VANIER, J. and LAROUCHE, R. [1978] A comparison of the wall shift of TFE and FEP teflon coatings in the hydrogen maser. *Metrologia*, Vol. 14, 31.
- VANIER, J., LAROUCHE, R. and AUDOIN, C. [28—30 May 1975] The hydrogen maser wall shift problem. Proc. 29th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 371—383 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).
- VESSOT, R. and LEVINE, M. [October 1970] A method for eliminating the wall shift in the hydrogen maser. *Metrologia*, Vol. 6, IV, 116—117.
- VESSOT, R. et al. [August 1971] Recent developments affecting the hydrogen maser as frequency standard. NBS Special Publication 343, Precision measurements and fundamental constants, 22—37.
- VESSOT, R.F.C., MATTISON, E.M., IMBIER and ZHAI, Z.C. [1984] Performance data of U.S. Naval Observatory VLG-11 hydrogen masers since September 1983. Proc. 16th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting (NASA, Goddard space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA).
- VLBI RESEARCH DEVELOPMENT GROUP, RRL [1984] The First US-JAPAN VLBI test observation by use of K-3 system of the Radio Research Laboratories. *J. Radio Res. Labs.*, Vol. 31, 132, 31—37.
- WALLS, F.L. [June 1987] Characteristics and performance of miniature NBS passive hydrogen masers. *IEEE Trans. Instr. and Meas.*, Vol. IM-36, 596—603.
- WALLS, F.L. and HELLWIG, H. [2—4 June 1976] A new kind of passively operating hydrogen frequency standard. Proc. 30th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 473—481 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).
- WALLS, F.L. and PERSSON, K.B. [June 1984] A new miniaturized passive hydrogen maser. Proc. 38th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 416—420 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).

- WEISS, M.A. and ALLAN, D.W. [June 1987] An NBS calibration procedure for providing time and frequency at a remote site by weighting and smoothing of GPS common view data. *IEEE Trans. Instr. and Meas.*, Vol. IM-36, 572—578.
- WINELAND, D.J., ALLAN, D.W., GLAZE, D.Y., HELLWIG, H.W. and JARVIS, S.Jr. [December 1976] Results on limitations in primary caesium standard operation. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-25, 4, 453—458.
- WINKLER, G.M.R., HALL, R.G. and PERCIVAL, D.B. [October 1970] The US Naval Observatory clock time reference and the performance of a sample of atomic clocks. *Metrologia*, Vol. 6, IV, 126—134.
- YAHYABEY, N., BARILLET, R., VIENNET, J. and AUDOIN, C. [March 1987] Accord automatique de la cavité résonnante d'horloges à hydrogène: résultats préliminaires, 1er forum Européen sur le Temps-Fréquence, Besançon.
- YASUDA, Y. and YOSHIMURA, K. [November 1964] Measurement of short term frequency instability and frequency spectra of highly stable oscillators. *J. Radio Res. Labs.* (Japan), Vol. 11, 58.
- ЖЕСТКОВА Н.Д., ЕЛКИН Г.А. [1979] Влияние неоднородного магнитного поля на частоту водородного генератора. *Изм. техн.*, 9, 37—38.
- ZITZEWITZ, P.W. and RAMSEY, N.F. [1971] Studies of the wall shift in the hydrogen maser. *Phys. Rev. A*, Vol. III, 51.

ЛИТЕРАТУРА

- AUDOIN, C., VIENNET, J., CYR, N. and VANIER, J. [1982] Influence of modulation frequency in rubidium cell frequency standards. Proc. 14th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA, 87—110.
- BOLLINGER, J.J., ITANO, W.M. and WINELAND, D.J. [1983] Laser cooled 9_{Be+} accurate clock. Proc. 37th Annual Symposium on Frequency Control, Philadelphia, PA. USA (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703) (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).
- CHIU, M., BATES, A.B., RUEGER, L.J., REINHARDT, V.S., DACHEL, P., KUNSKI, R., KRUEGER, R. and WARDRIP, S.C. [1982] The NASA/GSFC hydrogen maser program: a review of recent data. Proc. 14th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA.
- CUTLER, L.S., GIFFARD, R.P. and McGUIRE, M.D. [1983] Mercury — 199 trapped ion frequency standard: Recent theoretical progress and experimental results. Proc. 37th Annual Symposium on Frequency Control, Philadelphia, PA, USA (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703) (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).
- DIALS, M. and WERT, L. [December 1982] A commercial hydrogen maser, progress report. Proc. 14th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA.
- ITANO, W.M. and WINELAND, D.J. [September 1981] Precision measurement of the ground-state hyperfine constant of $^{25}Mg^{+}$. *Phys. Rev. A*, Vol. 24, 1364—1373.
- JARDINO, M., DESAINTFUSCIEN, M. and PLUMELLE, F. [1981] *J. de Phys.* Vol. 42, Supplement C-8, 327—338.
- PETERS, H.E. [4—6 June 1972] Hydrogen as an atomic beam standard. Proc. 26th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 230—241 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).
- VANIER, J., RACINE, G., KUNSKI, R. and PICARD, M. [1980] Progress Report on hydrogen maser development at Laval University. Proc. 12th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting (NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA) 807—824.
- WALLS, F.L. [1976] Design and results from a prototype passive hydrogen maser frequency standard. Proc. 8th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting (US Naval Research Laboratory, Washington, DC).

ОТЧЕТ 439-5

РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ЭФФЕКТЫ В НАЗЕМНОЙ КООРДИНАТНОЙ СИСТЕМЕ ВРЕМЕНИ

(Исследовательская программа ЗС/7)

(1970—1974—1978—1982—1986—1990)

1. Введение

Повышение точности сличений шкал времени вызывает необходимость принятия ряда соглашений и координатной системы отсчета, чтобы учесть релятивистские эффекты взаимосогласованным образом. Использование приемопередатчиков или атомных часов на борту спутников и реактивных воздушных судов в ближайшее время приведет к созданию сети стандартов времени, которые будут распределены по всему земному шару; задействованные при этом большие расстояния также вызывают необходимость в разработке четко установленных методик учета релятивистских эффектов при сличениях времени.

Консультативный комитет по определению секунды (CCDS) на 9-й сессии (23—25 сентября 1980 г.) признал эту необходимость и выдвинул следующее предложение, адресованное Международному комитету мер и весов (CIPM):

- ТАИ — координатная шкала времени, определенная на геоцентрической линии начала отсчета, размер единицы в которой соответствует 1 секунде в системе СИ, отнесенной к уровню геоида во вращении;
- определение этой шкалы, при современном уровне развития, может быть последовательно и с достаточной точностью распространено на любые стационарные или подвижные пункты около геоида путем введения поправок первого порядка из уравнений общей теории относительности, то есть поправок на различия в гравитационном потенциале и скорости и на вращение Земли.

Настоящий Отчет согласуется с предложением CCDS, однако он распространяет предложенные процедуры на высоты, на которых пролегают орбиты геостационарных спутников. Нижеприведенные уравнения описывают показатели работы часов с точностью, лучшей чем 1×10^{-14} .

Если время передается из пункта Р в пункт Q, то процесс может наблюдаться как в геоцентрической вращающейся системе отсчета, связанной с Землей (вариант R), так и в геоцентрической невращающейся местной инерциальной системе отсчета (вариант N).

2. Перевозка часов

2.1 Вариант R

При передаче времени из пункта Р в пункт Q с помощью перевозимых часов координатное время, накопленное при транспортировке, равно:

$$\Delta t = \int_P^Q ds \left[1 - \frac{\Delta U(\vec{r})}{c^2} + \frac{v^2}{2c^2} \right] + \frac{2\omega}{c^2} A_E, \quad (1)$$

где c — скорость света; ω — угловая скорость вращения Земли; v — скорость транспортировки часов по отношению к поверхности; $\vec{r}$ — вектор, который начинается в центре Земли и конец которого перемещается вместе с часами из Р в Q; A_E — экваториальная проекция площади, которую охватывает вектор, по мере того как его конец движется из пункта Р в пункт Q; $\Delta U(\vec{r})$ — разность потенциалов между местом нахождения часов на векторе $\vec{r}$ и геоидом при рассмотрении в земной системе координат, при этом условно принято, что $\Delta U(\vec{r})$ положительна, когда часы находятся над геоидом; ds — приращение собственного времени, накопленного в пере-

возимых часах. Это приращение является накопленным временем в перевозимых стандартных часах, измеренным в «покоящейся системе отсчета» часов, то есть в системе отсчета, перемещающейся вместе с часами. A_E измерено в системе координат, связанной с Землей. Так как площадь A_E изменяется, она берется положительной, когда проекция пути часов на поверхности экватора направлена на восток. Если высота часов h менее 24 км над геоидом, $\Delta U(r)$ может быть аппроксимирована gh , где g — полное ускорение силы тяжести (включая ускорение из-за вращения Земли), рассчитанное на геоиде. Эта аппроксимация применяется ко всем перемещениям по воздуху и по земле. Для h более 24 км разность потенциалов $\Delta U(r)$ должна быть рассчитана с большей точностью следующим образом:

$$\Delta U(\vec{r}) = -GM_e \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{a_1} \right) - \frac{1}{2} \omega^2 (r^2 \sin^2 \theta - a_1^2) + \frac{J_2 GM_e}{2a_1} \left[1 + \left(\frac{a_1}{r} \right)^3 (3 \cos^2 \theta - 1) \right], \quad (2)$$

где a_1 — экваториальный радиус Земли; r — величина вектора $\vec{r}$; θ — угловое расстояние между полюсом мира и горизонтом; GM_e — произведение массы Земли и гравитационной постоянной; J_2 — коэффициент квадратурного момента Земли, $J_2 = +1,083 \times 10^{-3}$.

2.2 Вариант N

При передаче времени из пункта P в пункт Q посредством часов координатное время, накопленное при движении часов, равно:

$$\Delta t = \int_P^Q ds \left[1 - \frac{U(\vec{r}) - U_g}{c^2} + \frac{v^2}{2c^2} \right], \quad (3)$$

где $U(\vec{r})$ — геопотенциал в месте нахождения часов, а v — скорость транспортировки часов, рассматриваемые (в отличие от уравнения (1)), в геоцентрической невращающейся системе отсчета; U_g — потенциал на геоиде с учетом эффекта вращения Земли. Отметим, что $\Delta U(r) \neq U(r) - U_g$, так как в величине $U(r)$ не учтено влияние вращения Земли. Это уравнение также применимо к часам на геостационарных орбитах, но на расстоянии, не превышающем 50 000 км от центра Земли.

3. Электромагнитные сигналы

3.1 Вариант R

С точки зрения геоцентрической вращающейся системы отсчета, связанной с Землей, координатное время, прошедшее между излучением и приемом электромагнитного сигнала, равно:

$$\Delta t = \frac{1}{c} \int_P^Q ds \left[1 - \frac{\Delta U(\vec{r})}{c^2} \right] + \frac{2\omega}{c^2} A_E, \quad (4)$$

где ds — приращение стандартной длины, или собственной длины, на трассе передачи сигнала; $\Delta U(\vec{r})$ — потенциал в точке вектора $\vec{r}$ на трассе передачи минус потенциал на геоиде (см. уравнение (3)) при рассмотрении в земной системе координат; A_E — площадь, являющаяся экваториальной проекцией треугольника с вершинами:

- в центре Земли;
- в пункте передачи сигнала, P;
- в пункте приема сигнала, Q.

Площадь A_E положительна, когда тракт сигнала направлен на восток. Численное значение второго члена уравнения составляет около наносекунды для трассы Земля—геостационарный спутник—Земля. В третьем члене $2\omega/c^2 = 1,6227 \times 10^{-6}$ нс/км²; этот член уравнения может дать величины порядка нескольких сот наносекунд для реальных значений A_E . За приращение собственной длины, ds , может быть принята длина, измеренная с помощью реперных точек, жестко закрепленных на вращающейся системе; это эквивалентно измерению длины путем умножения $c/2$ на время (приведенное к вакууму) прохождения электромагнитного сигнала по трассе передачи из пункта P в Q и в обратном направлении.

3.2 Вариант N

С точки зрения геоцентрической невращающейся (местной инерциальной) системы отсчета, координатное время, прошедшее между передачей и приемом электромагнитного сигнала, равно:

$$\Delta t = \frac{1}{c} \int_P^Q d\sigma \left[1 - \frac{U(\vec{r}) - U_g}{c^2} \right], \quad (5)$$

где $U(\vec{r})$ и U_g определены так же, как в уравнении (3), а $d\sigma$ — приращение стандартной длины, или собственной длины, на трассе передачи. Величины $d\sigma$ в уравнениях (4) и (5) немного отличаются, потому что системы отсчета, в которых они измеряются, перемещаются относительно друг друга.

4. Примеры

Из-за релятивистских эффектов часы, поднятые над поверхностью Земли, по-видимому, будут иметь более высокую частоту и будут отличаться от ТАИ на величину

$$\frac{\Delta U_T}{c^2},$$

где ΔU_T — разница в общем потенциале (гравитационный и центробежный потенциалы), а c — скорость света. Близ уровня моря это описывается следующим уравнением:

$$\frac{g(\varphi)h}{c^2}, \quad (6)$$

где $g(\varphi) = (9,780 + 0,052 \sin^2 \varphi)$ м/с²; φ — географическая широта; $g(\varphi)$ — величина полного ускорения на уровне моря (гравитационное и центробежное) и h — высота над уровнем моря. Уравнение (6) должно использоваться для сравнения первичных эталонов, воспроизводящих размер секунды в системе СИ, со шкалой ТАИ и друг с другом. Например, на широте 40° показания часов будут изменяться на величину $+ 1,091 \times 10^{-13}$ для каждого километра над уровнем моря.

Если часы перемещаются относительно поверхности Земли со скоростью v , которая может иметь составляющую v_E в направлении к востоку, нормализованная разница между частотой перемещающихся часов и частотой неподвижных часов, находящихся на уровне моря, равна:

$$- \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \frac{g(\varphi)h}{c^2} - \frac{1}{c^2} \cdot \omega \cdot r \cdot \cos \varphi \cdot v_E, \quad (7)$$

где ω — угловая скорость вращения Земли ($\omega = 7,992 \times 10^{-5}$ рад/с); r — расстояние от часов до центра Земли (радиус Земли = 6378,140 км); c — скорость света ($c = 2,99792458 \times 10^5$ км/с) и φ — географическая широта.

Например, если часы перемещаются со скоростью 270 м/с на восток на широте 40° и высоте 9 км, нормализованная разница между частотой перемещающихся часов и частотой неподвижных часов на уровне моря, обусловленная этими эффектами, равна:

$$- 4,06 \times 10^{-13} + 9,82 \times 10^{-13} - 1,072 \times 10^{-12} = - 4,96 \times 10^{-13}.$$

Этот выбор системы отсчета является абсолютно произвольным, но для определения координатного времени должен быть сделан особый выбор. Рекомендуется, чтобы для наземных измерений использовалась топоцентрическая система отсчета. В этой системе отсчета, когда часы В синхронизированы с часами А (и те, и другие часы являются неподвижными и находятся на поверхности Земли) радиосигналом, идущим из А в В, данные часы отличаются в координатном времени на величину:

$$B - A = - \frac{\omega}{c^2} \int_P^Q r^2 \cos^2 \varphi d\lambda, \quad (8)$$

где φ — географическая широта, λ — географическая долгота (положительное значение по направлению к востоку), а P — путь прохождения радиосигнала из А в В. Если двое часов синхронизированы перевозимыми часами, они будут отличаться в координатном времени на величину:

$$B - A = \int_P dt \left(\frac{\Delta U_T}{c^2} - \frac{v^2}{2c^2} \right) - \frac{\omega}{c^2} \int_P r^2 \cos^2 \varphi d\lambda, \quad (9)$$

где v — наземная скорость перевозимых часов, а P — путь перевозимых часов из А в В.

Эта разница также может составлять несколько десятых долей микросекунды. Уравнения (8) или (9) рекомендуется использовать как корректирующие уравнения для синхронизации часов на больших расстояниях. Так как уравнения (8) и (9) зависят от формы пути, они должны учитываться в каждой согласованной координатной системе времени.

Если часы перевозятся из пункта А в пункт В и возвращаются обратно в пункт А по другому пути с бесконечно малой скоростью и при $h = 0$, их время будет отличаться от времени часов, которые остались в А, на величину

$$\Delta t = - \frac{2\omega A_E}{c^2}, \quad (10)$$

где A_E — площадь, определяемая проекцией пути в прямом и обратном направлениях на поверхности экватора Земли. A_E считается положительной, если направление пути изменено на противоположное с точки зрения вращения, определяемого по движению часовой стрелки, при наблюдении с Южного полюса.

Например, поскольку

$$2\omega/c^2 = 1,6227 \times 10^{-6} \text{ нс/км}^2,$$

время часов, перемещаемых в восточном направлении вокруг Земли с бесконечно малой скоростью при $h = 0$ на экваторе, будет отличаться от времени неподвижных часов на $-207,4$ нс.

Дополнительные определения и соглашения находятся на рассмотрении Международного астрономического союза (IAU) [Guinot и Seidelmann, 1988].

ССЫЛКИ

GUINOT, B. and SEIDELMANN, P.K. [April 1988] Timescales — their definition and interpretation. *Astron. and Astrophys.*, Vol. 194, 304.

ЛИТЕРАТУРА

ASHBY, N. [1975] An earth-based coordinate clock network. NBS Tech. Note 659, 34, SD Catalogue No. C13.45:659. US Govt. Printing Office, Washington, DC 20402, USA.

ASHBY, N. and ALLAN, D. [1979] Practical applications of relativity for a global coordinate time scale. *Radio Sci.*, Vol. 14, 649—669.

BECKER, G. [1974] Time scales relativity. Report of Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, and Acts of the 2nd Cagliari Meeting on Time Determination, Dissemination and Synchronization. Ed.: Astron. Inst. of Cagliari, Italy.

BECKER, G., FISCHER, B., KRAMER, G. and MÜLLER, E.K. [1967] Die Definition der Sekunde und die allgemeine Relativitätstheorie (The definition of the second and the theory of general relativity). *PTB-Mitt.*, 77, 111.

BESSON, J. [1970] Comparison of national time standards by simple overflight. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-19, 4, 227—232.

BIH [1973] Annual Report of the Bureau international de l'heure, Paris, France.

BIH Circular D. Bureau international de l'heure, Paris, France.

CCDS [18—19 June 1970] Comité Consultatif pour la définition de la seconde, 5^e Session. Bureau international des poids et mesures, Sèvres, France.

- COHEN, J.M., MOSES, H.E. and ROSENBLUM, A. [1983] Clock transport synchronisation in noninertial frames and gravitational fields. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 51, 17, 1501—1502.
- FARLEY, F.J.M., BAILEY, J. and PICASSO, E. [6 January 1968] Experimental verifications of the theory of relativity. *Nature*, Vol. 217, 17—18.
- FRISCH, D.H. and SMITH, J.H. [1963] Measurement of the relativistic time dilation using μ -mesons. *Amer. J. Phys.*, Vol. 31, 342.
- GRANVEAUD, D.M. and GUINOT, B. [1972] Atomic time scales. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-21, 4, 396.
- GUINOT, B. [1969] Formation de l'échelle de temps coordonnée par le Bureau International de l'heure. Actes du Colloque International de Chronométrie, A-20, Série A, Paris, France.
- HAFELE, J.C. and KEATING, R.E. [1972] Around-the-world atomic clocks: predicted relativistic time gains. *Science*, Vol. 177, 4044, 166—170.
- HUDSON, G.E. [1964] Spacetime coordinate systems. Actes du Congrès International de Chronométrie, Lausanne, Switzerland.
- HUDSON, G.E., ALLAN, D.W., BARNES, J.A., HALL, R.G., LAVANCEAU, J.D. and WINKLER, G.M.R. [May 1969] A coordinate frequency and time system. Proc. 23rd Annual Symposium on Frequency Control, Com. E, Atlantic City, NJ, USA (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703) (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).
- IAU [1973] 15th General Assembly, Report of Commission 31. International Astronomical Union, Sydney, Australia.
- IVES, H. and STILLWELL, G.J. [1938] *Opt. Soc. Am.*, 28, 215.
- KING-HELE, D.G. [1980] The gravity field of the Earth. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, London, A 294, 317—328.
- MISNER, C., THORNE, K. and WHEELER, J. [1973] *Gravitation*. Freeman and Company, San Francisco, USA.
- POUND, R.V. and REBKA, G.A. Jr. [1960] Apparent weight of photons. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 4, 337.
- POUND, R.V. and SNIDER, J.L. [1964] Effect of gravity on nuclear resonance. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 13, 539.
- RAPP, R.H. [1974] Current estimates of mean earth ellipsoid parameters. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 1, 1, 35—48.
- REINHARDT, V. [3—5 December 1974] Relativistic effects of the rotation of the Earth on remote clock synchronization. Proc. 6th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Planning Meeting NASA/DOD (US Naval Research Laboratory, Washington, DC).
- REINHARDT, V.S., PREMO, D.A., FITZMAURICE, M.W., WARDRIP, S.C. and ARVENKA, P.O. [1978] Nanosecond time transfer via shuttle laser ranging experiment. Proc. 9th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Greenbelt, Md., USA, 319—342.
- RUEGER, L.J. and BATES, A.G. [July—August 1979] Nova satellite experiment. *Radio Sci.*, Vol. 14, 4, 707—714.
- RUTMAN, J. [16—21 January 1978] Application of space techniques to time and frequency dissemination and synchronization. Proc. European Workshop on Space Oceanography, Navigation, and Geodynamics (SONG), Schloss-Elmau, Federal Republic of Germany, ESAPS-137.
- SABURI, Y. [1976] Observed time discontinuity of clock synchronization in rotating frame of the Earth. *J. Radio Res. Labs.*, Vol. 23, 112, 255—265.
- SABURI, Y., YAMAMOTO, M. and HARADA, K. [1976] High-precision time comparison via satellite and observed discrepancy of synchronization. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-25, 4, 473.
- VESSOT, R.F.C. [1974] Lectures on frequency stability of clocks in the gravitational redshift experiment. *Experimental Gravitation*, 111—162. Ed. B. Bertotti, School of Physics Enrico Fermi, Academic Press, New York, NY, USA.
- VESSOT, R.F.C. and LEVINE, M.W. [1979] A test of the equivalence principle using a space-borne clock. *General Relativity and Gravitation*, Vol. 10, 3, 181—204.

ОТЧЕТ 579-4

АЛГОРИТМ ШКАЛЫ ВРЕМЕНИ И СВЯЗАННЫЕ С НИМ ПРОБЛЕМЫ УСРЕДНЕНИЯ

(Исследовательская программа 10B/7)

(1974—1978—1982—1986—1990)

1. Стабильность шкалы

В большинстве лабораторий местная независимая шкала времени формируется на базе ансамбля коммерческих цезиевых стандартов и поддерживается на одном и том же заданном уровне без калибровки с помощью лабораторных первичных стандартов. Для достижения высокой стабильности шкалы в отдельные стандарты вводятся поправки на прогнозируемое изменение хода часов и применяются соответствующие весовые коэффициенты.

Прогнозирование изменения хода часов совершенно необходимо для сохранения стабильности шкалы времени при заменах состава ансамбля часов и их весового вклада. Обычно этим можно пренебречь при формировании шкал посредством неизменяющихся групп часов, имеющих постоянные статистические веса [Guinot, 1987].

Простейшим и широко распространенным методом прогнозирования изменения хода часов является усреднение наблюдаемого изменения хода часов в течение последнего интервала времени измерения (линейное прогнозирование) относительно ансамбля часов. Данный метод, однако, не подтвержден теоретическими выкладками. Национальное бюро стандартов разработало близкий к оптимальному метод рекурсивного прогнозирования для реалистичных моделей частотных флуктуаций [Allan и Gray, 1971; Allan и др., 1973]. Этот метод учитывает как кратковременный, так и долговременный весовые коэффициенты (то есть пару весовых коэффициентов) для каждого часа из ансамбля в отдельности. Кроме того, используется адаптивный фильтр (оценивающий работу каждого часа), реагирующий на ухудшение характеристик часов, а также на изменения в стохастических процессах [Allan и др., 1974; Allan и Weiss, 1988]. В некоторых случаях бывает достаточным более простой метод взвешивания: часы оцениваются либо полным «весом 1», либо — в случае неудовлетворительной работы — «весом 0». Применяются также методы усреднения характеристик часов, которые позволяют использовать различные допущения, относящиеся к режиму работы часов и к понятию стабильной шкалы времени [Winkler и др., 1970; Percival, 1978]. Эти методы используют процедуры итерации с текущими корректировками, которые компенсируют влияние отдельных часов в ансамбле, имеющих чрезмерно большие отклонения от ожидаемых характеристик.

Научные исследования, проведенные в Федеральном физико-техническом институте (РТВ) и в других лабораториях, показали, что случайная модель может быть недостаточной для полной характеристики режима долговременной работы. Например, могут иметь место систематические уходы и скачкообразные изменения частоты. Исследования были направлены на идентификацию этих регулярных эффектов [Ganter, 1979]. Они выявили особую необходимость в точной калибровке часов.

В Соединенном Королевстве предполагается внедрить шкалу времени, объединяющую метрологические возможности нескольких учреждений, первоначально Национальной физической лаборатории (NPL) и Королевской гринвичской обсерватории (RGO). Такая система могла бы стать чем-то вроде промежуточного звена между центральной и распределенной системами и обладала бы преимуществами обоих по доступности и надежности. Централизация вычислений шкалы времени наряду с соответствующей модернизацией линий сличений эталонов привели бы к удовлетворению требований, предъявляемых к точности [Gibbs, 1980].

Усовершенствованный метод вычислений шкалы времени с учетом весового вклада часов [Imae, 1979; RRL, 1978] был введен Исследовательской лабораторией по радио (RRL), в настоящее время известной как Научно-исследовательская лаборатория связи (CRL), Япония. За счет использования полученных по долговременным ($\tau \geq 10$ суток) и кратковременным ($\tau \leq 1$ суток) вариациям весовых коэффициентов для каждого часа можно повысить как кратковременную, так и долговременную стабильность шкалы времени. Компьютерное моделирование показало, что можно добиться значительных улучшений в вычислениях шкалы времени, если систематическая погрешность вариаций хода часов компенсируется до того, как эти вариации будут использованы для определения отдельных весовых коэффициентов [Yoshimura, 1980].

Стабильность шкалы времени, использующей для коррекции систематической погрешности вариаций хода часов компенсированные весовые коэффициенты, соответствующие долговременной и кратковременной стабильности, оказалась примерно равной 2×10^{-13} для времени усреднения от 10 до 300 суток при сравнении со шкалой TAI через Logan-C (9970-M) четырех коммерческих цезиевых стандартов (Cs2 и Cs3).

Шкалы атомного времени Шанхайской и Шаньсийской обсерваторий были установлены на основе ансамблей рубидиевых часов, соответственно, в 1978 и 1979 годах. Эталонами для калибровки шкалы атомного времени Шанхайской обсерватории являются цезиевый пучковый стандарт и три водородных лазера, а эталонами для шкалы атомного времени Шаньсийской обсерватории — два водородных лазера. Все атомные часы, используемые в этих двух обсерваториях, были разработаны и изготовлены в Китайской Народной Республике [Chuang и Jai, 1980 и 1981; Shaanxi Observatory, 1979].

Шкалы атомного времени Шанхайской и Шаньсийской обсерваторий сравнивались между собой и с другими шкалами атомного времени Китая через телевизионные каналы и с использованием перевозимых часов, а с зарубежными шкалами времени UTC через спутник и НЧ (Logan-C) и ОНЧ передачи. Долговременная нестабильность шкалы атомного времени Шанхайской обсерватории за время выборки 30 дней составила $(3-4) \times 10^{-13}$ относительно шкалы UTC (USNO) за двухлетний период начиная с 1978 года. Долговременная стабильность шкалы атомного времени Шаньсийской обсерватории сопоставима со стабильностью шкалы Шанхайской обсерватории.

Шкала атомного времени Государственного института метрологии (NIM) Китая была установлена в 1980 году. Эта шкала основана на ансамбле из четырех коммерческих цезиевых стандартов (HP-5061A) и прокалибрована двумя первичными лабораторными цезиевыми пучковыми стандартами (Cs2 и Cs3). Более чем за год непрерывной работы погрешность шкалы ТА (NIM), как было установлено, составила 1×10^{-12} (1 σ). Стабильность шкалы ТА (NIM) равна $\sigma_y(\tau = 10 \text{ суток}) \leq 1 \times 10^{-13}$ (это значение было получено по внутренней сходимости).

Во Франции с 1968 года для вычисления французской шкалы атомного времени ТА(F) используются сличения данных 12 цезиевых часов, расположенных в различных лабораториях, по телевизионным каналам. Для формирования средней шкалы времени применяется метод статистического взвешивания, использующий в качестве статистического критерия долговременную стабильность каждого стандарта. Каждый вес может варьироваться в пределах 0—1. Средний вес увеличился с 0,4—0,5 в 1972—1973 годах до 0,8—0,98 в 1981—1982 годах. С 1972 года стабильность шкалы времени ТА(F) относительно шкалы TAI составляет примерно $\pm 3 \times 10^{-13}$. 1 января 1977 года частота ТА (F) была уменьшена на 15×10^{-13} для максимального согласования с размером секунды в системе СИ. В 1983 году вариации частоты шкалы находились в пределах от -3 до -5×10^{-13} . Поскольку шкала ТА(F) не формируется первичным лабораторным стандартом, ее точность определяется средней частотой используемых коммерческих часов.

В июне 1982 года Национальное бюро стандартов и МБВ совместно провели 2-й Международный симпозиум по алгоритмам шкалы атомного времени в NBS(Боулдер, США). Среди других вопросов обсуждались:

- методы хранения времени;
- автоматизированная высокоточная фазовая измерительная система [Stein и др., 1982];
- история и структура ALGOS;
- метод максимального правдоподобия для оценки параметров часов и разработка алгоритма фильтра Калмана, основанного на этих параметрах, для минимизации временной дисперсии в ансамбле [Jones и Тгуон, 1983];
- использование робастовой статистики в формировании шкал времени;
- международные сличения шкал времени с точностью на уровне 10 нс с использованием метода одновременного наблюдения сигналов спутников GPS [Davies и др., 1981];
- система ансамбля часов в реальном масштабе времени в NBS;
- отчеты по хранению времени в различных международных лабораториях.

В 1987—1988 годах были опубликованы некоторые дополнительные важные результаты, касающиеся различных влияний на точность и стабильность шкалы времени. Было установлено, что изменения влажности коррелируются с частотными изменениями в нескольких коммерческих цезиевых пучковых стандартах [Bava и др., 1987; Gray и др., 1988]. Остающаяся пока необъясненной долговременная стабильность миллисекундных пульсаров вызвала необходимость в повышении стабильности частоты шкал времени и лучшем использовании технических средств на международной основе [Rawley, 1987; Allan, 1987]. Более очевидной стала необходимость пост-анализа, то есть генерирования [воссоздания] шкал времени в ретроспективе, и учета систематических помех и влияния окружающей среды, а также стохастических возмущений [Allan и др., 1989; Guinot, 1988]. В частности, Гино воссоздал шкалу времени TTWPM88 (шкала наземного времени МБВ на 1988 год) в ретроспективе, что потребовалось для анализа результатов измерений в астрометрии миллисекундных пульсаров. Следствием возросшего интереса к долговременной стабильности шкалы времени явилось проведение 3-го Международного симпозиума по алгоритмам шкалы атомного времени; материалы симпозиума имеются в NIST. Модифицированный алгоритм шкалы времени Калмана был разработан для часов станции контроля системы GPS и в настоящее время проходит испытания [Stein, 1988; Gifford и Varnum, 1988].

2. Точность

Вышеупомянутые методы могут привести к значительному уменьшению отклонения частоты на большом интервале времени. Для согласования момента шкалы времени и размера секунды должна осуществляться коррекция частоты.

Одна из проблем заключается в определении величины частотной поправки для случая, когда имеются несколько методов калибровки шкалы времени относительно первичных стандартов. Есимура [1972], Азубиб и др. [1977] вывели формулы, дающие значения калибровок шкал времени для обычных моделей случайных шумов.

В Национальном исследовательском совете Канады до 28 декабря 1975 года коммерческие цезиевые часы калибровались дважды в неделю по стандарту CsIII [Mungall, 1971]. С указанной даты шкала TA(NRC) стала формироваться непосредственно на базе первичного стандарта времени и частоты, CsV, с гравитационной поправкой 0,97 нс в день. Ежегодные оценки, выполнявшиеся в течение 12 лет, показали, что в большинстве случаев часы сохраняли расчетную точность на уровне 5×10^{-14} . Время от времени (1985 и 1987 годы) старение компонентов существенно влияло на значения частот часов (сдвиг частоты порядка $1-2 \times 10^{-13}$). С 1979 года три малогабаритных первичных стандарта, CsVI A, B и C, стали эксплуатироваться на постоянной основе в качестве часов. По оценкам, погрешность часов CsVI обычно находится в пределах погрешности CsV, составляющей 5×10^{-14} , при внешнем предельном значении 1×10^{-13} . Однако магнитные поля и разность фаз резонатора у малогабаритных стандартов оказались менее стабильными, чем у CsV, поэтому потребовалось выполнить целый ряд оценок на 6-месячных интервалах для поддержания точности этих стандартов пределах $1,5 \times 10^{-13}$ [Mungall и Costain, 1983]. В МБВ представляются регулярные отчеты о характеристиках отдельных часов. NBS проводит полный анализ характеристик своих первичных стандартов приблизительно ежегодно, а результаты используются в алгоритме управления для контроля шкалы TA(NBS) [Allan и др., 1975]. Преимущество этого алгоритма управления заключается в том, что он учитывает кратковременную стабильность (сутки—недели) ансамбля часов NBS, а также долговременную стабильность, определяемую точностью первичного стандарта. Таким образом, показания шкалы TA (NBS) всегда согласовываются с размером секунды в системе СИ.

До июля 1978 года шкала атомного времени ТА(РТВ) Федерального физико-технического института в Брауншвейге определялась на основе усреднения весов коммерческих часов ансамбля [Hübner, 1979]. Калибровка частоты шкалы ТА (РТВ) проводилась в среднем 4 раза в год с помощью первичного стандарта Cs1. С момента ввода (1978 г.) в постоянную эксплуатацию стандарта Cs1, шкала ТА(РТВ) формируется непосредственно на основе первичного стандарта. Наиболее важные рабочие параметры Cs1 измеряются через регулярные интервалы. Изменение направления цезиевого пучка осуществляется каждые 5—6 недель [Becker, 1979]. В период 1977—1983 годов относительная разность частот шкал атомного времени ТА (NRC) Национального исследовательского Совета Канады и ТА(РТВ), формируемых с помощью первичных стандартов, составляла менее 7×10^{-14} за время усреднения 80 суток.

3. Международное атомное время (TAI)

До августа 1973 года шкала TAI представляла собой среднюю шкалу, определяемую на основе 7 местных независимых шкал атомного времени. Весовые коэффициенты этих шкал рассматривались Беккером и Хьюбнером [1973]; этими авторами, а также в Международном бюро времени (МБВ) были апробированы несколько методов статистического взвешивания [Granveaud и Guinot, 1972]. Вследствие трудностей в присвоении весов шкалам времени с июня 1973 года МБВ начало непосредственно применять данные отдельных часов с использованием поправок на прогнозируемое изменение хода часов и методов статистического взвешивания, приведенных в Ежегодном отчете МБВ за 1973 год. С 1 января 1977 года применяется новая методика поддержания размера единицы шкалы времени TAI в соответствии с размером секунды в системе СИ на уровне геоида (см. Ежегодный отчет МБВ за 1977 год).

Повышение точности атомных часов и сличений шкал времени вызвали необходимость пересмотра правил определения весовых вкладов часов, участвующих в формировании шкалы TAI, сначала в 1981 году, а затем в 1988 году. Согласно действующему с 1 января 1988 года правилу определения весовых вкладов, максимальный вес приписывается часам, имеющим:

$$\sigma_y(N = 6, \tau = 2 \text{ месяца}) = 3,7 \times 10^{-14}.$$

МБМ исследовало чувствительность алгоритма шкалы типа TAI к случайным и регулярным вариациям [Granveaud, 1982]. Подробная информация о вычислениях шкалы TAI с 1973 по 1984 годы приведена в издании «Шкалы атомного времени» [Granveaud, 1986].

ССЫЛКИ

- ALLAN, D.W., GLAZE, D.J., MACHLAN, H. E., WAINWRIGHT, A. E., HELLWIG, H., BARNES, J. A. and GRAY, J. E. [12—14 June 1973] Proc. 27th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703, USA), 334 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).
- ALLAN, D.W. and GRAY, J.E. [1971] Comments on the October 1970 Metrologia paper «The US Naval Observatory clock time reference and the performance of sample atomic clocks». *Metrologia*, Vol. 7, 79.
- ALLAN, D.W., GRAY, J.E., and MACHLAN, H.E. [May 1974] The National Bureau of Standards Atomic Time Scale. Generation, stability, accuracy, and accessibility. NBS Monograph 140 (edited by B.E. Blair), Chapter 9, 205—231.
- ALLAN, D., HELLWIG, H. and GLAZE, D. [1975] An accuracy algorithm for an atomic time scale. *Metrologia*, Vol. 11, 133—138.
- ALLAN, D.W., WEISS, M.A. [1988] *The NBS Time Scale Algorithm, AT1*. NBS Technical Note 1316.
- ALLAN, D. [June 1987] Millisecond pulsar rivals best atomic clock stability. Proc. 41st Annual Symposium on Frequency Control, 2—11.
- ALLAN, D., WEISS, M., and PEPPLER, T. [June 1989] In search of the best clock. *Trans. IEEE Instrumentation and Measurement*.
- AZOUZIB, J., GRANVEAUD, M. and GUINOT, B. [1977] Estimation of the scale unit duration of time scales. *Metrologia*, Vol. 13, 87.
- BAVA, E., CORDARA, F., PETTITE, V., and TAVELLA, P. [December 1987] Analysis of the seasonal effects on a cesium clock to improve the long-term stability of a time scale. Proc. 19th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Redondo Beach, CA, 185—202.
- BECKER, G. [1979] Das Cäsium-Zeit-und Frequenznormal CS1 der PTB als primäre Uhr (The caesium time and frequency standard CS1 of the PTB as primary clock). 10th International Congress of Chronometry, Geneva, Vol. 2, 33—40.
- BECKER, G. and HUBNER, U. [1973] PTB Annual Report for 1972, 125.

- CHUANG, C-H. and JAIR, T-C. [1980 and 1981] Atomic time and frequency standards development at Shanghai Observatory China. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-29, 3, 158—162 and Vol. IM-30, 1, 80.
- DAVIS, D., WEISS, M., CLEMENTS, A. and ALLAN, D. [December 1981] Unprecedented syntonization and synchronization accuracy via simultaneous viewing with GPS receivers and construction characteristics of an NBS/GPS receiver. Proc. 13th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA, 527—547.
- GANTER, W. [1973] NBS Tech. Note No. 636, Boulder, Colo., USA.
- GIBBS, J.E. [1980] Towards a United Kingdom atomic time scale. DES Memorandum No. 33, National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, TW11 0LW, England.
- GIFFORD, A. and VARNUM, F. [September 1988] The NRL hydrogen maser ensemble and a GPS time steer experiment. Proc. 3rd International Algorithm Symposium, Torino, Italy, 203—238.
- GRANVEAUD, M. [24—25 June 1982] Response of TAI-like algorithms to random and non-random variations. Proc. 2nd Symposium on Atomic Time Scale Algorithms, Boulder, CO, USA.
- GRANVEAUD, D.M. and GUINOT, B. [1972] Atomic time scales. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-21, 4, 396.
- GRANVEAUD, M. [1986] Échelles de temps atomique. Collection of monographs of the Bureau National de Métrologie, Editions Chiron, Paris.
- GRAY, J., MACHLAN, H., and ALLAN, D. [June 1988] The effect of humidity on commercial cesium beam atomic clocks. Proc. 42nd Annual Symposium on Frequency Control, Baltimore, MD, USA (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 514—518 (Electronic Industries Association, Washington, DC 2006, USA).
- GUINOT, B. [1987] Some properties of algorithms for time scales. *Métrieologie*, 24, 195—198.
- GUINOT, B. [1988] Atomic time scales for pulsar studies and other demanding applications. *Astronomy and Astrophysics*, 192, 370—373.
- HÜBNER, U. [1979] Der Algorithmus zur Berechnung der gesetzlichen Zeitskala der Bundesrepublik Deutschland (The algorithm used for the calculation of the legal time scale of the Federal Republic of Germany). 10th International Congress of Chronometry, Geneva, Vol. 2, 71—75.
- IMAE, M. [1979] A technique of mean atomic time scale generation by caesium clocks. *Rev. Radio Res. Labs.*, Japan, Vol. 25, 49—57.
- JONES, R. and TRYON, P.V. [January/February 1983] Estimating time from atomic clocks. *NBS J. Res.*, Vol. 80, 1, 17—24.
- MUNGALL, A.G. [1971] Atomic time scales. *Metrologia*, Vol. 7, 146.
- MUNGALL, A.G. and COSTAIN, C.C. [1983] Performance of the four NRC long-beam primary caesium clocks CsV, CsVIA, CsVIB and CsVIC. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-32, 1, 224—227.
- PERCIVAL, D.B. [December 1978] The U.S. Naval Observatory clock time scales. *IEEE Trans. Instr. and Meas.*, IM-27, 376—385.
- RAWLEY, L., TAYLOR, J., DAVIS, M., and ALLAN, D. [November 1987] Millisecond pulsar PSR 1937+21: A highly stable clock. *Science*, Vol. 238, 761—765.
- RRL [1978] Radio Research Laboratories. Japan. Standard frequency and time service bulletin. Annual Report for 1978.
- SHAANXI OBSERVATORY [October 1979] Standard frequency and time service bulletin.
- STEIN, S., GLAZE, D., LEVINE, J., GRAY, J., HILLIARD, D., HOWE, D. and ERB, L. [June 1982] Performance of an automated high accuracy phase measurement system. Proc. 36th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 314—321 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).
- STEIN, S. [September 1988] Kalman ensembling algorithm: Aiding sources approach. Proc. 3rd International Algorithm Symposium, Torino, Italy, 345—358.
- WINKLER, G.M.R., HALL, R.G. and PERCIVAL, D.B. [October 1970] The US Naval Observatory clock time reference and the performance of sample atomic clocks. *Metrologia*, Vol. 6, 126.
- YOSHIMURA, K. [1972] NBS Tech. Note No. 626, Boulder, Colo., USA.
- YOSHIMURA, K. [1980] Calculation of unbiased clock-variances in uncalibrated atomic time scale algorithms. *Metrologia*, Vol. 16, 133—139.

ОТЧЕТ 580-3

ОПИСАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТОТНЫХ И ФАЗОВЫХ ШУМОВ

(Исследовательская программа 3В/7)

(1974—1978—1986—1990)

1. Введение

Способы описания и измерения фазовых и частотных нестабильностей в генераторах частоты и в сигналах радиоприема имеют важнейшее значение для пользователей стандартов времени и частоты.

В 1964 году был сформирован подкомитет по стабильности частоты в 14-м Комитете по стандартам Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (IEEE), а позднее, в 1966 году, в Техническом комитете по частоте и времени Общества приборов и измерений (SIM) с целью подготовки стандартов стабильности частоты IEEE. В 1969 году этот подкомитет подготовил документ, в котором предлагались единицы и меры стабильностей частоты и фазы. Эти рекомендованные меры стабильностей в генераторах частоты получили широкое признание среди пользователей времени и частоты во всем мире. Ряд основных производителей аппаратуры дают характеристики стабильностей в своих стандартах, используя эти меры.

Модели нестабильности могут включать стационарные и нестационарные случайные процессы, а также систематические процессы. Ощутимый прогресс был достигнут в области чисто случайных процессов [IEEE-NASA, 1964; IEEE, 1972] в плане описания этих процессов с помощью вполне надежных статистических моделей. Напротив, наличие систематических изменений в частоте, например сдвиги частоты, не следует описывать с помощью статистических моделей; должны быть применены рациональные аналитические методы с опорой на достаточно надежный эталонный стандарт, например, метод линейной регрессии для определения модели линейного сдвига частоты. Однако разделение между систематическими и случайными флуктуациями не всегда выполнимо или очевидно [Barnes, 1983]. Систематические эффекты становятся преобладающими в основном на долговременных отрезках, поэтому чрезвычайно важно определять их точно, чтобы дать полную картину стабильности сигнала [Allan, 1987]. В настоящем Отчете представлен ряд методов описания случайных процессов и некоторых наиболее важных типов систематических процессов.

За прошедшее время были получены новые значительные результаты по рассматриваемым вопросам. Например, Богх (Baugh) [1971] рассмотрел особенности вариации Адамара — время-разностный (time-domain) метод оценки дискретной модуляции частоты в боковых полосах, особенно подходящий для частот Фурье в полосе менее 10 Гц; математический анализ этого метода был сделан Соважем и Рутманом [1973]; Рутман [1972] предложил некоторые альтернативные время-разностные методы, хотя в целом продолжал придерживаться рекомендаций подкомитета; Де Принс и др. [1969] и Де Принс и Корнелиссен [1971] предложили альтернативные методы измерения стабильности частоты в частотной области с выборкой моделей дискретных спектров. Одно из изданий Национального бюро стандартов посвятило главу 8 «Статистике анализа данных времени и частоты» [Blair, 1974]. В этой главе приведены некоторые методы измерений фазовых/частотных нестабильностей как в частотной, так и во временной областях. В ней также описаны методы пересчета между разными время-разностными мерами, а также связь измерений в частотной области с измерениями во временной области и наоборот. Уточнены особенности влияния ограниченного числа измерений на точность с использованием двухвыборочной дисперсии [Lesage и Audoin, 1973, 1974 и 1976; Yoshimura, 1978; Howe и др., 1981]. Для интерпретации измерений стабильности частоты были применены модели типа Бокса—Дженкинса [Barnes, 1976; Percival, 1976]; реферирование выполнил Уинклер [1976].

Линдсей и Чай [1976] обобщили среднеквадратическое отклонение (СКО) частоты и двухвыборочную дисперсию в плане предложения более широкого класса время-разностных мер для измерения стабильности генераторов. Они разработали единицы измерения, характеризующие случайную фазовую нестабильность сигнала генератора во временной области путем использования структурных функций Колмогорова. Эти методы связываются с измерениями стабильности в частотной области $S_y(f)$ через преобразование Меллина. В эту теорию включены сдвиги полиномиального типа, а также облегчено решение некоторых теоретических проблем сходимости, обусловленных степенным законом для спектральной плотности. Показана близкая связь этих единиц измерения с СКО девиации частоты [Cutler и Searle, 1966] и с двухвыборочной дисперсией [Allan, 1966]. И наконец, показана важность применения ряда других разработанных единиц измерения стабильности при спецификации характеристик и записывающих систем для таких применений, как радиолокация, связь и разработки в области систем слежения.

Рассмотрены и другие типы ограниченных выборочных дисперсий [Baugh, 1971; Lesage и Audoin, 1975; Boileau и Picinbono, 1976]; опубликован обзор классических и новых подходов [Rutman, 1978].

Нестабильности частоты и фазы, характеризующиеся случайными процессами, могут быть представлены в частотном спектре разложения Фурье или во временной области [Blackman и Tukey, 1959]. Мгновенная нормализованная девиация частоты $y(t)$ от номинальной частоты ν_0 является отношением мгновенной фазовой флуктуации $\varphi(t)$ к номинальной фазе $2\pi\nu_0 t$:

$$y(t) = \frac{1}{2\pi\nu_0} \frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{\varphi(t)}{2\pi\nu_0} \quad (1)$$

$$x(t) = \frac{\varphi(t)}{2\pi\nu_0},$$

где $x(t)$ — фазовая девиация, определенная в единицах времени.

2. Частотный спектр разложения Фурье

В частотном спектре разложения Фурье стабильность частоты может быть определена различными односторонними (диапазон частот ряда Фурье от 0 до ∞) спектральными плотностями, такими как:

$$S_y(f) \text{ от } y(t), S_\varphi(f) \text{ от } \varphi(t), S_\phi(f) \text{ от } \phi(t), S_x(f) \text{ от } x(t) \text{ и т. д.}$$

Эти спектральные плотности связаны уравнениями:

$$S_y(f) = \frac{f^2}{\nu_0^2} S_\varphi(f), \quad (2)$$

$$S_\phi(f) = 4\pi^2 f^2 S_\varphi(f), \quad (3)$$

$$S_x(f) = \frac{1}{(2\pi\nu_0)^2} S_\varphi(f). \quad (4)$$

Спектральные плотности степенного закона часто применяются как достаточно надежные модели случайных флуктуаций в прецизионных генераторах. На практике было определено, что для многих генераторов эти случайные флуктуации являются суммой пяти независимых шумовых процессов и с некоторыми ограничениями могут быть представлены следующим уравнением:

$$S_y(f) = \begin{cases} \sum_{\alpha=-2}^{+2} h_\alpha f^\alpha & \text{при } 0 < f < f_h \\ 0 & \text{при } f > f_h \end{cases} \quad (5)$$

где h_a — константа, α — целые числа и f_h — верхняя граничная частота низкочастотного фильтра. Уравнения (2), (3) и (4) откорректированы и применимы для стационарных шумов, включая фазовые. Высокочастотная составляющая частоты устраняется ограничениями на f в уравнении (5). Идентификация и характеристики пяти шумовых процессов приведены в таблице I и показаны на рис. 1. На практике достаточно всего двух-трех шумовых процессов для описания случайных флуктуаций частоты в конкретном типе генератора; другими шумами обычно можно пренебречь.

3. Временная область

Нестабильность частоты, обусловленная случайными процессами, во временной области может быть охарактеризована различными дисперсионными выборками. Рекомендованной характеристикой является двухвыборочная стандартная девиация, которая представляет собой корень квадратный двухвыборочной дисперсии нулевого мертвого времени $\sigma_y^2(\tau)$ [von Neumann и др., 1941; Allan, 1966; Barnes и др., 1971], определенной по формуле:

$$\sigma_y^2(\tau) = \left\langle \frac{(\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k)^2}{2} \right\rangle, \quad (6)$$

где

$$\bar{y}_k = \frac{1}{\tau} \int_{t_k}^{t_k + \tau} y(t) dt = \frac{x_{k+1} - x_k}{\tau} \text{ и } t_{k+1} = t_k + \tau \quad (\text{соседние выборки}),$$

$\langle \rangle$ означает усреднение на бесконечном интервале. Характеристика, данная уравнением (6), часто называется дисперсией Аллена. x_k и x_{k+1} — остаточные измерения времени, выполненные на t_k и $t_{k+1} = t_k + \tau$, $k = 1, 2, \dots$, а $1/\tau$ — фиксированный интервал выборки, дающий нулевое мертвое время между измерениями частоты. Термин «остаточный» означает, что систематические эффекты сняты.

Если начальная величина выборки определена как $1/\tau_0$, то, как показано [Howe и др., 1981], в общем можно получить более эффективную оценку $\sigma_y(\tau)$ путем использования того, что называют «перекрывающейся оценкой». Эту оценку получают путем расчетов по уравнению (7).

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(N - 2n)\tau^2} \sum_{i=1}^{N-2n} (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i)^2, \quad (7)$$

где N — число исходных смежных измерений с интервалами τ_0 ($N = M + 1$, где M — количество исходных частотных измерений эталонного времени, τ_0) и $\tau = n\tau_0$.

Было установлено, что если между измерениями отклонений частоты существует мертвое время и это не учитывается при расчетах по уравнению (6), результирующие значения стабильности (если они не превышают дисперсии Аллена) будут смещены (за исключением белых частотных шумов) при перегруппировке измерений частоты для оценки стабильности для $n\tau_0$ ($n > 1$). Это смещение было рассчитано, и опубликованы таблицы для его коррекции [Barnes и Allan, 1988; Lesage, 1983].

Если мертвого времени нет, то исходные отсчеты $\bar{y}_i$ могут быть объединены в виде ряда по $\bar{y}_k$:

$$\bar{y}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=k}^{k+n-1} \bar{y}_i.$$

«Перекрывающаяся оценка» $\sigma_y(\tau)$ может быть получена из:

$$\sigma_y(\tau) = \left| \frac{1}{2(M-2n+1)} \sum_{k=1}^{M-2n+1} (\bar{y}_{k+n} - \bar{y}_k)^2 \right|^{1/2}. \quad (8)$$

Таким образом, можно весьма просто установить зависимость $\sigma_y(\tau)$ как функцию от τ из единого ряда данных.

График дисперсии $\sigma_y(\tau)$ в зависимости от τ для стандарта частоты, характеризующий вклад различных шумовых процессов, представлен на рис. 1. Первая часть при $\sigma_y(\tau) \sim \tau^{-1/2}$ (белый частотный шум) и/или $\sigma_y(\tau) \sim \tau^{-1}$ (белый или фликкер-фазовый шум) отражает роль шумов в основных характеристиках стандартов. В случае $\sigma_y(\tau) \sim \tau^{-1}$ нет смысла пытаться определить, что ухудшает работу генератора — белый фазовый или фликкер-фазовый шум. Ниже приведены технические альтернативы. Это ограничивает использование дисперсии $\sigma_y(\tau)$ в случаях, когда есть необходимость изучить природу существующих источников шумов в генераторе. Анализ шумов в частотной области обычно соответствуют частотам Фурье, превышающим 1 Гц. Зависимость τ^{-1} и/или $\tau^{-1/2}$ сохраняется с увеличением времени усреднения до того момента, когда будет достигнута так называемая «фликкер-полка», после чего $\sigma_y(\tau)$ не зависит от времени усреднения τ . Этот режим обнаружен почти во всех стандартах частоты; он зависит от особенностей конкретного стандарта частоты, и его физическая природа пока не вполне ясна. Примерами возможных причин возникновения «фликкер-полки» являются флуктуации напряжения источника питания, флуктуации магнитного поля, изменения в компонентах стандарта и изменения СВЧ мощности. Конец кривой на графике показывает ухудшение стабильности с увеличением времени усреднения. Обычно это проявляется на интервалах времени от нескольких часов до нескольких суток, в зависимости от конкретного типа стандарта.

Была разработана модифицированная дисперсия Аллена, $\text{MOD } \sigma_y^2(\tau)$ [Allan и Barnes, 1981], которая способна давать различную зависимость от τ белого фазового шума и фликкер-фазового шума. Соответствующие зависимости для $\text{MOD } \sigma_y(\tau)$ составляют $\tau^{-3/2}$ и τ^{-1} , соответственно. Отношения между $\sigma_y(\tau)$ и $\text{MOD } \sigma_y(\tau)$ описаны также в работах [Allan и Barnes, 1981; IEEE, 1983; Lesage и Ayi, 1984]. $\text{MOD } \sigma_y(\tau)$ определяется из следующего уравнения:

$$\text{MOD } \sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2\tau^2 n^2 (N - 3n + 1)} \sum_{j=1}^{N-3n+1} \left[\sum_{i=j}^{n+j-1} (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i) \right]^2, \quad (9)$$

где N — исходное число временных вариаций, определенных через τ_0 , а $\tau = n\tau_0$ — время выборки счета.

Свойства и точность оценок обсуждаются в работе Лесажа и Айти [1984]. Джонс и Трайон [1983], а также Барнес и др. [1982] разработали методы максимальной вероятности для оценки $\sigma_y(\tau)$ для конкретных моделей белого частотного шума и шума случайных блужданий. Установлено, что эти две модели пригодны для описания нестабильности цезиевых пучковых стандартов с временем выборки больше нескольких секунд.

4. Преобразование между частотными и временными областями

Если известна спектральная плотность нормализованных частотных флуктуаций $S_y(f)$, то двухвыборочная дисперсия может быть вычислена по формуле [Barnes и др., 1971; Rutman, 1972]:

$$\sigma_y^2(\tau) = 2 \int_0^{f_h} S_y(f) \frac{\sin^4 \pi \tau f}{(\pi \tau f)^2} df. \quad (10)$$

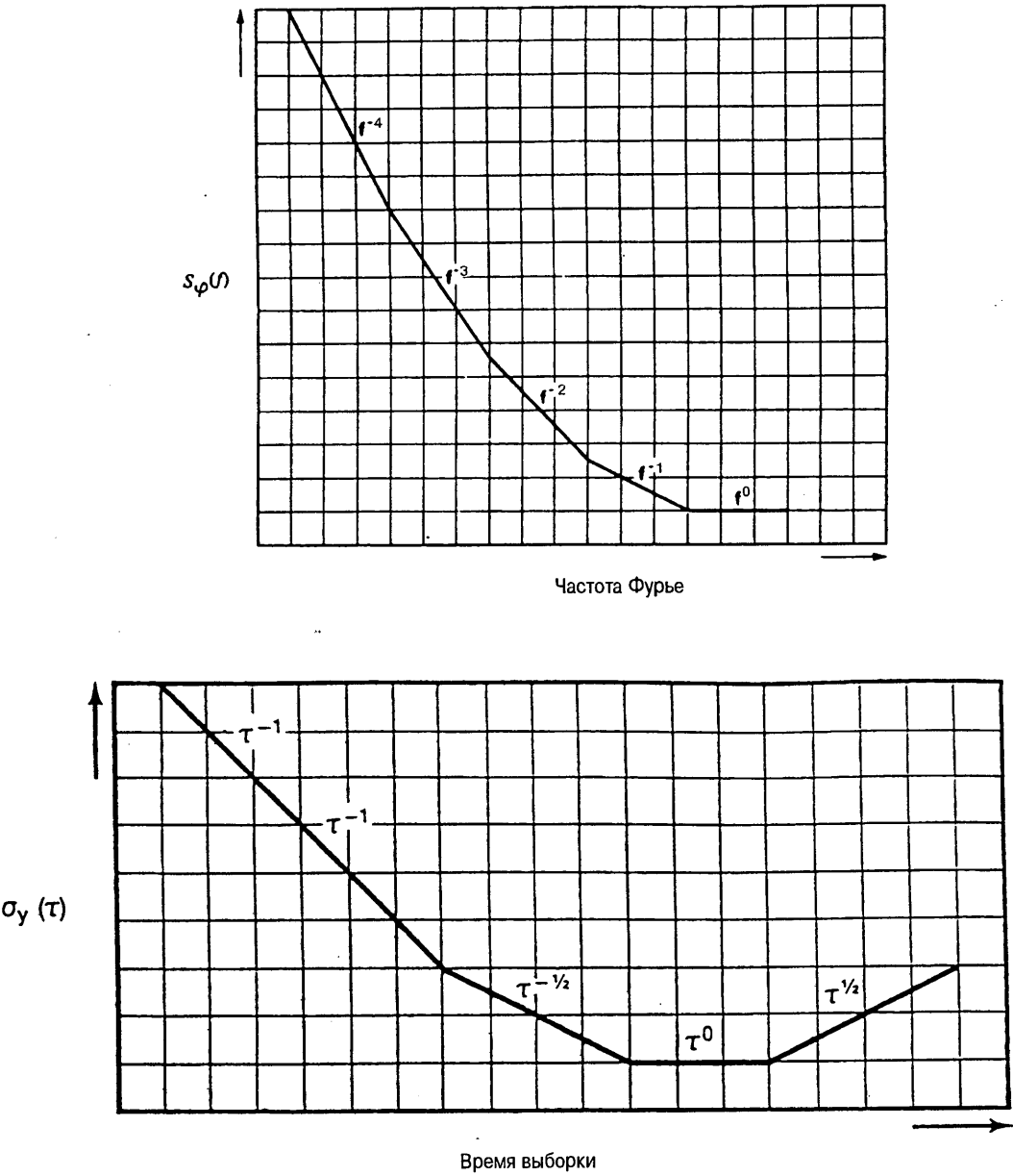


РИСУНОК 1 — Характеристики наклона пяти независимых шумовых процессов (логарифмическая шкала)

Для модели степенного закона, данной в уравнении (5), дисперсия во временной области также следует степенному закону, полученному Катлером из уравнений (5) и (10).

$$\sigma_y^2(\tau) = h_{-2} \frac{(2\pi)^2}{6} \tau + h_{-1} 2 \log_e 2 + h_0 \frac{1}{2\tau} + h_1 \frac{1,038 + 3 \log_e(2\pi f_h \tau)}{(2\pi)^2 \tau^2} + h_2 \frac{3f_h}{(2\pi)^2 \tau^2} \quad (11)$$

Примечание. — Число 1,038 в четвертом члене уравнения (11) представляет собой поправку к данным, приведенным в большинстве предшествующих публикаций.

Значения h_α — это характеристики частотного шума генератора. Следует отметить, что для значений, выраженных целыми числами (что чаще всего и бывает), $\mu = -\alpha - 1$ при $-3 \leq \alpha \leq 1$ и $\mu \cong -2$ при $\alpha \geq 1$, где $\sigma_y^2(\tau) \sim \tau^\mu$.

Эти преобразования были проверены экспериментально [Brandenberger и др., 1971] и на основе вычислений [Chi, 1977]. Таблица II дает коэффициенты перехода измерений стабильности частоты из временной области в частотную и наоборот.

Характеристики наклона пяти независимых шумовых процессов в частотной и временной областях графически показаны на рис. 1 (двойная логарифмическая шкала).

5. Методы измерения

Спектральная плотность фазовых флуктуаций $S_\phi(f)$ может быть примерно измерена с помощью замкнутых контуров фазовой автоподстройки (ФАП) и низкочастотного анализатора спектра [Meyer, 1970; Walls и др., 1976]. Двойной балансный смеситель используется в качестве фазового детектора в схеме с использованием двухконтурной ФАП. Измерительная система использует наиболее совершенные из доступных электронных компонентов; в качестве эталона применен высококачественный генератор. Для очень низких частот Фурье (гораздо ниже 1 Гц) применялись цифровые методы [Atkinson и др., 1963; De Prins и др., 1969; Babich и Oliverio, 1974]. Использовались новые методы измерения стабильности времени (фазы) и частоты с пикосекундной точностью по времени [Allan и Daams, 1975], а также измерений частот Фурье фазового шума, обеспечивающие чувствительность примерно на 30 дБ выше, чем при наиболее точных предыдущих измерениях [Walls и др., 1976].

Для определения стабильности генераторов во временной области с измерением или без измерения мертвого времени были использованы различные измерительные системы, применяющие счетчики частоты [Allan, 1974; Allan и Daams, 1975]. Была также разработана измерительная система без счетчика [Rutman, 1974; Rutman и Sauvage, 1974]. Измерения частоты без мертвого времени могут быть сделаны по образцовым интервалам времени вместо непосредственного измерения частоты. Изучены также сложности, возникающие, когда существует мертвое время между соседними измерениями; по этим вопросам приняты рекомендации [Blair, 1974; Allan и Daams, 1975; Ricci и Peregrino, 1976]. Дискретные спектры были измерены Гросламбертом и др. [1974].

6. Доверительные интервалы измерений во временной области

Для оценки доверительного интервала или погрешностей [«усов» на графике] для модели шумов с гауссовым распределением при определенном значении дисперсии $\sigma_y(\tau)$, полученном из конечного числа выборок [Lesage и Audion, 1973], установлено, что:

$$\text{Доверительный интервал } I_\alpha \approx \sigma_y(\tau) \cdot \kappa_\alpha \cdot M^{-1/2} \text{ при } M > 10, \quad (12)$$

где:

M — общее количество единичных данных, использованных в оценке,

α — определено в предыдущем разделе,

$\kappa_2 = \kappa_1 = 0,99$,

$\kappa_0 = 0,87$,

$\kappa_{-1} = 0,77$,

$\kappa_{-2} = 0,75$.

В качестве примера гауссовой модели с $M = 100$, $\alpha = -1$ (фликкер-частотный шум) и $\sigma_y(\tau = 1 \text{ секунда}) = 10^{-12}$, можно написать:

$$I_a \approx \sigma_y(\tau) \cdot \kappa_a \cdot M^{-1/2} = \sigma_y(\tau) \cdot (0,77) \cdot (100)^{-1/2} = \sigma_y(\tau) \cdot (0,077), \quad (13)$$

что дает

$$\sigma_y(\tau = 1 \text{ секунда}) = (1 \pm 0,08) \times 10^{-12}. \quad (14)$$

Был также разработан модифицированный метод оценки, учитывающий мертвое время между парами измерений [Yoshimura, 1978] и показывающий влияние автокорреляции частотных флуктуаций.

Упомянутые выше доверительные интервалы применяются к «неперекрывающимся оценкам». В случае перекрывающихся оценок доверительный интервал меньше и может быть вычислен по методике, разработанной, в частности, Хау и др. [1981].

Было установлено, что суммарное смещение, обусловленное применением двухвыборочной дисперсии интервалов времени для смежных последовательных измерений с мертвым временем, зависит от типа шумов. Это смещение может быть значительным [Lesage, 1984; Barnes и Allan, 1988].

Было рассмотрено воздействие аналоговой фильтрации, ограничивающей шумовую мощность сигнала вблизи его номинальной частоты [Lesage, 1987], в особенности при использовании низкочастотного фильтра вместо полосового фильтра, центрированного на номинальной частоте.

Вышеупомянутые доверительные интервалы взяты, в частности, из работы Хау и др. [1981]. Есимюра [1989] вычислил степени свободы (d.f.) для случаев «перекрывающихся оценок». Они теоретически выведены и построены графически для оценки доверительного интервала двухвыборочной стандартной девиации степенного закона спектральной плотности. Доверительный интервал для двухвыборочной стандартной девиации $\sigma_y(\tau)$ равен:

$$\frac{\sqrt{(\text{d.f.}) \hat{\sigma}_y^2(\tau)}}{\chi_{P_1}} < \sigma_y(\tau) < \frac{\sqrt{(\text{d.f.}) \hat{\sigma}_y^2(\tau)}}{\chi_{P_2}}, \quad (15)$$

где: χ_{P_1} и χ_{P_2} являются процентильными значениями для распределения по критерию « χ^2 », а символ « $\hat{\cdot}$ » означает оценку или измерение двухвыборочной дисперсии ограниченного ряда измерений.

Для $\alpha = +2$ увеличение d.f. примерно в n раз лучше, чем в варианте с неперекрывающимися оценками. Значительное улучшение также достигается для $\alpha = +1$. Для $\alpha = 0$ отношение степеней свободы равно 2; для $\alpha = -1$ оно равно 1,3; и для $\alpha = -2$ оно составляет 1,04.

7. Заключение

Статистические методы описания нестабильностей фазы и частоты и соответствующей модели степенного закона спектральной плотности достаточны для описания нестабильности генератора на коротком промежутке времени. Уравнение (9) показывает, что спектральная плотность может быть однозначно преобразована во временную область измерений. Обратная зависимость справедлива не для всех случаев, но, безусловно, верна для случая степенного закона спектров, часто используемого при конструировании точных генераторов.

Детерминированные вариации данной моделью не описываются. Они могут быть как периодическими, так и монотонными. Периодические вариации анализируются известными методами гармонического анализа. Монотонные вариации описываются линейным членом или членами более высокого порядка.

ТАБЛИЦА I — Функциональные характеристики пяти независимых шумовых процессов, вызывающих нестабильность частоты генераторов

Описание шумового процесса	Характеристики наклона на графике в двойном логарифмическом масштабе			
	Частотная область		Временная область	
	$S_y(f)$	$S_\varphi(f)$ or $S_x(f)$	$\sigma^2(\tau)$	$\sigma(\tau)$
	α	$\beta = \alpha - 2$	μ	$\mu/2$
Частотный шум случайного блуждания	-2	-4	1	1/2
Фликкер-частотный шум	-1	-3	0	0
Белый частотный шум	0	-2	-1	-1/2
Фликкер-фазовый шум	1	-1	-2	-1
Белый фазовый шум	2	0	-2	-1

$$S_y(f) = h_\alpha f^\alpha$$

$$S_\varphi(f) = v_0^2 h_\alpha f^{\alpha-2} = v_0^2 h_\alpha f^\beta \quad (\beta = \alpha - 2)$$

$$S_x(f) = \frac{1}{4\pi^2} h_\alpha f^{\alpha-2} = \frac{1}{4\pi^2} h_\alpha f^\beta$$

$$\sigma^2(\tau) \sim |\tau|^\mu$$

$$\sigma(\tau) \sim |\tau|^{\mu/2}$$

ТАБЛИЦА II — Связь характеристик стабильности частоты между спектральной плотностью в частотной области с дисперсией во временной области и наоборот (для $2\pi f \gg 1$)

Описание шумового процесса	$\sigma_y^2(\tau) =$	$S_y(f) =$	$S_\phi(f) =$
Частотный шум случайного блуждания	$A [f^2 S_y(f)] \tau^1$	$\frac{1}{A} [\tau^{-1} \sigma_y^2(\tau)] f^{-2}$	$\frac{V_0^2}{A} [\tau^{-1} \sigma_y^2(\tau)] f^{-4}$
Фликкер-частотный шум	$B [f S_y(f)] \tau^0$	$\frac{1}{B} [\tau^0 \sigma_y^2(\tau)] f^{-1}$	$\frac{V_0^2}{B} [\tau^0 \sigma_y^2(\tau)] f^{-3}$
Белый частотный шум	$C [f^0 S_y(f)] \tau^{-1}$	$\frac{1}{C} [\tau^1 \sigma_y^2(\tau)] f^0$	$\frac{V_0^2}{C} [\tau^1 \sigma_y^2(\tau)] f^{-2}$
Фликкер-фазовый шум	$D [f^{-1} S_y(f)] \tau^{-2}$	$\frac{1}{D} [\tau^2 \sigma_y^2(\tau)] f^1$	$\frac{V_0^2}{D} [\tau^2 \sigma_y^2(\tau)] f^{-1}$
Белый фазовый шум	$E [f^{-2} S_y(f)] \tau^{-2}$	$\frac{1}{E} [\tau^2 \sigma_y^2(\tau)] f^2$	$\frac{V_0^2}{E} [\tau^2 \sigma_y^2(\tau)] f^0$

$$A = \frac{4\pi^2}{6}$$

$$D = \frac{1,038 + 3 \log_e(2\pi f_h \tau)}{4\pi^2}$$

$$B = 2 \log_e 2$$

$$E = \frac{3f_h}{4\pi^2}$$

$$C = 1/2$$

ССЫЛКИ

ALLAN, D.W. [February 1966] Statistics of atomic frequency standards. *Proc. IEEE*, Vol. 54, 221—230.

ALLAN, D.W. [December 1974] The measurement of frequency and frequency stability of precision oscillators. Proc. 6th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Planning Meeting NASA/DOD (US Naval Research Laboratory, Washington, DC), 109—142.

ALLAN, D.W. [November 1987] Time and frequency characterization, estimation, and prediction of precision clocks and oscillators. *IEEE Trans. on UFFC* (Special Issue on Frequency Control) (готовится к печати).

ALLAN, D.W. and BARNES, J.A. [May 1981] A modified «Allan Variance» with increased oscillator characterization ability. Proc. 35th Annual Symposium on Frequency Control. Philadelphia, PA, USA (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 470—476 (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).

ALLAN, D.W. and DAAMS, H. [May 1975] Picosecond time difference measurement system. Proc. of the 29th Annual Symposium on Frequency Control, 404—411.

ATKINSON, W.K., FEY, L. and NEWMAN, J. [February 1963] Spectrum analysis of extremely low-frequency variations of quartz oscillators. *Proc. IEEE*, Vol. 51, 2, 379.

BABITCH, D. and OLIVERIO, J. [1974] Phase noise of various oscillators at very low Fourier frequencies. Proc. of the 28th Annual Symposium on Frequency Control, 150—159.

- BARNES, J. A. [August 1976] Models for the interpretation of frequency stability measurements. NBS Technical Note 683.
- BARNES, J.A. [December 1983] The measurement of linear frequency drift in oscillators. Proc. 15th Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, 551—579.
- BARNES, J.A. and ALLAN, D.W. [1988] Variances with dead time between the measurements for power-law spectra. NBS-Technical Note No. 1318.
- BARNES, J.A., CHI, A.R., CUTLER, L.S., HEALEY, D.J., LEESON, D.B., MCGUNIGAL, T.E., MULLEN, J.A., SMITH, W.L., SYDNOR, R., VESSOT, R.F. and WINKLER, G.M.R. [May 1971] Characterization of frequency stability. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-20, 105—120.
- BARNES, J.A., JONES, R.H., TRYON, P.V. and ALLAN, D.W. [December 1982] Noise models for atomic clocks. Proc. 14th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA, 295—307.
- BAUGH, R.A. [1977] Frequency modulation analysis with the Hadamard variance. Proc. 25th Annual Symposium on Frequency Control, 222—225.
- BLACKMAN, R.B. and TUKEY, J.M. [1959] The measurement of power spectra. (Dover Publication, Inc., New York, N.Y.).
- BLAIR, B.E. (Ed.) [May 1974] Time and frequency: theory and fundamentals. NBS Monograph No. 140. (US Government Printing Office, Washington, D.C. 20402).
- BOILEAU, E. and PICINBONO, B. [March 1976] Statistical study of phase fluctuations and oscillator stability. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. 25, 1, 66—75.
- BRANDENBERGER, H., HADORN, F., HALFORD, D. and SHOAF, J.H. [1971] High quality quartz crystal oscillators: frequency-domain and time-domain stability. Proc. 25th Annual Symposium on Frequency Control, 226—230.
- CHI, A.R. [December 1977] The mechanics of translation of frequency stability measures between frequency and time-domain measurements. Proc. 9th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Greenbelt, MD, USA.
- CUTLER, L.S. and SEARLE, C.L. [February 1966] Some aspects of the theory and measurement of frequency fluctuations in frequency standards. *Proc. IEEE*, Vol. 54, 136—154.
- DE PRINS, J. and CORNELISSEN, G. [October 1971] Analyse spectrale discrète. Eurocon (Lausanne, Switzerland).
- DE PRINS, J., DESCORNET, G., GORSKI, M. and TAMINE, J. [December 1969] Frequency-domain interpretation of oscillator phase stability. *IEEE Trans. Instr. and Meas.*, Vol. IM-18, 251—261.
- GROSLAMBERT, J., OLIVIER, M. and UEBERSFELD, J. [December 1974] Spectral and short-term stability measurements. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-23, 4, 518—521.
- HOWE, D.A., ALLAN, D.W. and BARNES, J.A. [May 1981] Properties of signal sources and measurement. Proc. 35th Annual Symposium on Frequency Control, Philadelphia, PA, USA (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703), 669—717 (Electronics Industries Association, Washington, DC 20006, USA).
- IEEE [May 1972] Special issue on time and frequency. *Proc. IEEE*, Vol. 60, 5.
- IEEE [1983] *Frequency Stability: Fundamentals and Measurement*, 77—80. Ed. V.F. Kroupa. IEEE Press Books.
- IEEE-NASA [1964] Proceedings of Symposium on short-term frequency stability. NASA Publication SP 80.
- JONES, R.H. and TRYON, P.V. [January—February 1983] Estimating time from atomic clocks. *NBS Res.*, Vol. 88, 1, 17—24.
- LESAGE, P. [1983] Characterization of frequency stability: Bias due to the juxtaposition of time interval measurements. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-32, 1, 204—207.
- LESAGE, P. [1984] Mesure de la stabilité de fréquence des oscillateurs: quelques aspects liés à l'utilisation de la variance à deux échantillons — CIC 84, Besançon, October 1984, Proceedings, 85—90.
- LESAGE, P. [1987] Caractérisation de la stabilité de fréquence: incidence de la forme du filtrage du signal. First European Time-Frequency Forum, Besançon, March 1987, Proceedings, 61—65.

- LESAGE, P. and AUDOIN, F. [June 1973] Characterization of frequency stability: uncertainty due to the finite number of measurements. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-22, 1, 103.
- LESAGE, P. and AUDOIN, C. [March 1974] Correction to: Characterization of frequency stability: uncertainty due to finite number of measurements. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-23, 1, 103.
- LESAGE, P. and AUDOIN, F. [May 1975] A time domain method for measurement of the spectral density of frequency fluctuations at low Fourier frequencies. *Proc. of the 29th Annual Symposium on Frequency Control*, 394—403.
- LESAGE, P. and AUDOIN, C. [September 1976] Correction to: Characterization of frequency stability: uncertainty due to the finite number of measurements. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-25, 3.
- LESAGE, P. and AYI, T. [December 1984] Characterization of frequency stability: analysis of modified Allan variance and properties of its estimate. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-33, 4, 332—336.
- LINDSEY, W.C. and CHIE, C.M. [December 1976] Theory of oscillator instability based upon structure functions. *Proc. IEEE*, Vol. 64, 1662—1666.
- MEYER, D.G. [November 1970] A test set for the accurate measurements of phase noise on high-quality signal sources. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-19, 215—227.
- PERCIVAL, D.B. [June 1976] A heuristic model of long-term atomic clock behavior. *Proc. of the 30th Annual Symposium on Frequency Control*.
- RICCI, D.W. and PEREGRINO, L. [June 1976] Phase noise measurement using a high resolution counter with on-line data processing. *Proc. of the 30th Annual Symposium on Frequency Control*.
- RUTMAN, J. [February 1972] Comment on characterization of frequency stability. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-21, 2, 85.
- RUTMAN, J. [March 1974] Characterization of frequency stability: a transfer function approach and its application to measurements via filtering of phase noise. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-23, 1, 40—48.
- RUTMAN, J. [September 1978] Characterization of phase and frequency instabilities in precision frequency sources: fifteen years of progress. *Proc. IEEE*, Vol. 66, 9, 1048—1075.
- RUTMAN, J. and SAUVAGE, G. [December 1974] Measurement of frequency stability in the time and frequency domains via filtering of phase noise. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-23, 4, 515, 518.
- SAUVAGE, G. and RUTMAN, J. [July—August 1973] Analyse spectrale du bruit de fréquence des oscillateurs par la variance de Hadamard. *Ann. des Télécom.*, Vol. 28, 7—8, 304—314.
- VON NEUMANN, J., KENT, R.H., BELLINSON, H.R. and HART, B.I. [1941] The mean square successive difference. *Ann. Math. Stat.*, 12, 153—162.
- WALLS, F.L., STEIN, S.R., GRAY, J.E. and GLAZE, D.J. [June 1976] Design considerations in state-of-the-art signal processing and phase noise measurement systems. *Proc. of the 30th Annual Symposium on Frequency Control*.
- WINKLER, G.M.R. [December 1976] A brief review of frequency stability measures. *Proc. 8th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting (US Naval Research Laboratory, Washington, DC)*, 489—528.
- YOSHIMURA, K. [March 1978] Characterization of frequency stability: Uncertainty due to the autocorrelation of the frequency fluctuations. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, IM-27 1, 1—7.
- YOSHIMURA, K. [1989] Degrees of freedom of the estimate of the two-sample variance in the continuous sampling method. *IEEE Trans., Instrum. Meas.*, Vol. IM-38, No. 4.

ЛИТЕРАТУРА

- ALLAN, D.W., et al. [1973] Performance, modelling, and simulation of some caesium beam clocks. Proc. 27th Annual Symposium on Frequency Control, 334—346.
- FISCHER, M.C. [December 1976] Frequency stability measurement procedures. Proc. 8th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting (US Naval Research Laboratory, Washington, DC), 575—618.
- HALFORD, D. [March 1968] A general mechanical model for $|f|^\alpha$ spectral density noise with special reference to flicker noise $1/|f|$. *Proc. IEEE (Corres.)*, Vol. 56, 3, 251—258.
- MANDELBROT, B. [April 1967] Some noises with $1/f$ spectrum, a bridge between direct current and white noise. *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol. IT-13, 2, 289—298.
- RUTMAN, J. and UEBERSFELD, J. [February 1972] A model for flicker frequency noise of oscillators. *Proc. IEEE*, Vol. 60, 2, 233—235.
- VANIER, J. and TETU, M. [1978] Time domain measurement of frequency stability: a tutorial approach. Proc. 10th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting, Washington, DC, USA, 247—291.
- VESSOT, R. [1976] Frequency and Time Standards. Chap. 5.4 Methods of Experimental Physics, Academic Press, 198—227.
- VESSOT, R., MUELLER, L. and VANIER, J. [February 1966] The specification of oscillator characteristics from measurements made in the frequency domain. *Proc. IEEE*, Vol. 54, 2, 199—207.
- WINKLER, G.M.R., HALL, R.G. and PERCIVAL, D.B. [October 1970] The US Naval Observatory clock time reference and the performance of a sample of atomic clocks. *Metrologia*, Vol. 6, 4, 126—134.
-

ОТЧЕТ 738-3

ЧАСТОТНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ В ДАЛЬНОМ ИНФРАКРАСНОМ, ИНФРАКРАСНОМ
И ВИДИМОМ СВЕТОВОМ УЧАСТКАХ СПЕКТРА

(Вопрос 5/7)

(1978—1982—1986—1990)

1. Введение

За последние 20 лет был достигнут огромный прогресс в области использования оптического диапазона частот (частоты выше 300 ТГц). Особенно заметные успехи достигнуты в генерировании и измерении оптических частот, которые нашли применение в разнообразных областях: в электросвязи (связь с высокой скоростью по битам, космические линии связи и т.д.), геодезии и фундаментальных научных исследованиях (теория относительности, постоянная Ридберга, астрономия). Прецизионные оптические измерения привели к революции в метрологии длин. 17-я Генеральная конференция по мерам и весам (октябрь 1983 года) уточнила скорость света до величины $c = 299\,792\,458$ м/с, определив единицу длины следующим образом [CIPM, 1983]: «Метр — это длина пути, пройденного светом в вакууме за интервал времени, равный $\frac{1}{299\,792\,458}$ секунды.»

Это определение длины можно вычислить путем измерения интервала времени или измерения частоты, используя отношение $\lambda = c/f$ между длиной волны и частотой излучения. Список рекомендованных значений для лазерных частот (таблица I) был принят Международным комитетом мер и весов [CIPM, 1983].

В настоящем Отчете рассматриваются методы, применяемые в оптической метрологии частот, и работа генераторов частоты в оптической области. В нем излагаются новейшие достижения на основе обзоров, опубликованных на 1989 год [Guelachvili, Narahari Rao, 1986; Jennings и др., 1986; Knight, 1986; Vanier и Audoin, 1989]. В Отчет включены также некоторые основные новые разработки в этой быстро изменяющейся области метрологии. Настоящий Отчет дополняет Отчет 364, в котором речь идет о генераторах стандартных частот в радио- и микроволновом диапазонах. Некоторые аспекты применения оптических частот, конкретно касающиеся электросвязи, даны в Отчетах 680 и 681-1 2-й Исследовательской комиссии МККР.

2. Технические аспекты

Измерения частот до видимого спектра не могут в настоящее время проводиться в одну ступень в сравнении с цезиевым стандартом частоты. Однако в настоящее время значительные усилия направлены на создание аппаратуры, прямо связывающей диапазоны от нескольких сот ТГц до нескольких сот ТГц (видимая область). Кроме того, лазеры сами по себе не могут служить стандартами частоты; их частота зависит от геометрии оптического резонатора. Обе эти проблемы были разрешены разработкой методов стабилизации частоты, в основном с использованием насыщения линии поглощения, а также внедрением гетеродинной техники в оптическую область.

2.1 Стабилизация частоты лазеров

Высокая стабильность частоты (выше 10^{-10}) может быть получена лишь с помощью синхронизации лазерной излучающей частоты с высокостабильным репером, являющимся молекулярной или атомной линией. Для получения эталона частоты с узкой полосой (относительная ширина от 10^{-8} до 10^{-10}) должно быть устранено уширение линии, обусловленное эффектом Доплера и давлением. Могут быть рассмотрены различные методы: атомный или молекулярные пучки (в сочетании с эффектом Рамсея или без него); насыщение линии поглощения или двухфотонный переход. Широкое применение получил метод насыщения линии поглощения. Впервые он был продемонстрирован в 1967 году [Lee и Skolnick, 1967] для неоновой ячейки, помещенной в резонатор лазера. Этот метод был успешно использован и для стабилизации других лазеров. В качестве газа поглощающей ячейки применялись, в частности, молекулы SF_6 , OsO_4 , CH_4 , I_2 и многих других веществ.

Был также разработан метод стабилизации частоты с использованием насыщенной флюоресценции (для CO_2 и NO_2 лазеров).

2.2 Нелинейные элементы

Прямой счет циклов за каждую единицу времени может выполняться до нескольких ГГц; измерение более высоких частот требует использования гетеродинного метода, при котором сигналы нескольких генераторов, в том числе генератора с неизвестной частотой, смешиваются на нелинейном элементе для получения непосредственно измеряемой частоты биений.

Частоты до 4 ТГц могут быть синтезированы прямым генерированием гармоник частот ниже 100 ГГц с использованием небольших диодов Шотки (коэффициент умножения около 50) [Weiss и Sakurai, 1987] или переходов Джозефсона (коэффициент умножения около 80) [Miki и Sakuma, 1987].

На частотах свыше 4 ТГц только точечный контактный диод металл-диэлектрик-металл (МДМ), впервые примененный в лаборатории MIT [Hocker и др., 1968], обеспечивает в инфракрасном диапазоне генерирование гармоник до 12-й [Evenson и др., 1970] и смешение с сигналами видимого участка спектра [Jennings и др., 1986]. При использовании МДМ диодов для генерирования гармоник можно получить частоту от 150 до около 200 ТГц. Интересно отметить, что разность частот в несколько ТГц между лазерами, работающими в видимом участке спектра, была получена с использованием W-Ni диодов. Работа этого диода основана, по-видимому, на туннельном переходе металл-окисел-металл (МОМ) для некоторых материалов (W-Ni, W-Co, W-Nb и т. д.) [Riccus, Siemsen, 1984]. Была исследована долговременная стабильность МДМ диодов [Sakurai, 1986].

На частоте свыше 200 ТГц для умножения частоты используются нелинейные кристаллы (например, ниобат лития). Для измерений с СВ лазерами частоты видимого спектра могут быть достигнуты с использованием лишь двухступенчатого умножения.

2.3 Частотно-умножительные цепи

Поскольку умножительные свойства нелинейных элементов достаточно ограничены, для синтеза частот от СВЧ диапазона до оптического необходимо использование нескольких промежуточных генераторов. Все устройства: лазеры, нелинейные элементы и дополнительные генераторы — вместе составляют частотно-умножительную цепь. Генераторы с аппаратурой фазовой синхронизации значительно повысили точность измерений частоты в оптическом диапазоне, выполняемых с помощью таких частотно-умножительных цепей.

3. Генераторы оптического диапазона

Многие лаборатории работают над метрологией оптических частот с целью повышения стабильности, воспроизводимости и точности синхронизированных лазеров, разрабатывая устройства для измерения даже более высоких частот и упрощения синтеза частот.

Из различных изученных лазеров, характеристики которых рекомендованы CIPM в 1983 году, особую метрологическую значимость представляет CO_2 лазер. Был составлен исчерпывающий список лазеров [Weber, 1982].

3.1 Генераторы дальнего инфракрасного диапазона

При синтезе высоких частот необходимо проходить участок дальней части инфракрасного диапазона, который является продолжением микроволновой области. Соответствующие лазеры и другие генераторы частоты этого диапазона имеют особенно большое значение для применений в области спектроскопии и астрономии [Godone и др., 1987; Inguscio и др., 1986; Nolt и др., 1987]. Все известные CW лазерные излучения инфракрасного диапазона приведены Дугласом [Douglas, 1989].

3.2 CO_2 лазеры

CO_2 лазер является основной установкой почти в каждом эксперименте синтеза частоты в инфракрасном и видимом диапазонах. Это обусловлено целым рядом хороших характеристик этого прибора (по мощности, стабильности, частотному диапазону). Стабилизированный с помощью поглощающей ячейки на OsO_4 этот лазер имеет стабильность в несколько единиц на 10^{-14} за 100 с и точность около $1,5 \times 10^{-12}$ [Clairon и др., 1985]. Помимо стабильных линий $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$ на этих лазерах [Petersen и др., 1983] можно получить много других линий за счет использования более высоких энергетических уровней [Siemsen и Whitford, 1977] или других изотопов [Bradley и др., 1986]. Частотно-умножительные цепи с использованием только CO_2 лазеров синхронизируются по частоте по цезиевому стандарту на периоды до 20 минут [Whitford, 1984].

3.3 $\text{HeNe}(\text{CH}_4)$ лазеры

Это первый стабилизированный лазер с высокими метрологическими характеристиками [Barger и Hall, 1969]: стабильность около 3×10^{-13} за 1 с и воспроизводимость порядка 10^{-11} ; он используется для определения скорости света [Evenson и др., 1973]. В дополнение к этому, будучи единственным лазером, частота которого измерена несколькими лабораториями, занимающимися синтезом оптических частот, он может использоваться для международных сличений [Akimoto, 1987; Akimoto и Felder, 1989; Басов и др., 1987; Багаев и др., 1987; Clairon и др., 1988; Weiss и др., 1988]. Воспроизводимость малогабаритных лазеров различных конструкций обычно ограничена несколькими килогерцами. Однако более эффективные разработки с использованием Е-компоненты метана, выполненные в СССР, позволили обеспечить точность, близкую к 10^{-12} [Малышев и др., 1980]. $\text{HeNe}(\text{CH}_4)$ лазеры обеспечивают кратковременную стабильность порядка нескольких единиц на 10^{-15} при усреднении от 1 до 10 с [Багаев и др., 1981]. Были продемонстрированы часы, работающие от лазера, стабилизированного по метану [Багаев и др., 1983].

3.4 Другие лазеры

Во многих лабораториях были разработаны HeNe и аргоновый лазеры, стабилизированные насыщением линии поглощения в иоде, которые используются как в метрологии длин, так и в спектроскопии высокого разрешения. Лазеры, использующие внутреннюю или внешнюю поглощающую ячейку, обеспечивают воспроизводимость, близкую к 10^{-12} и 10^{-10} , соответственно. Важным дополнением к рекомендованным СИРМ частотам (таблица I) является прямое измерение частоты $^{127}\text{I}_2$ стабилизированного лазера на частоте 520 ТГц с погрешностью (1σ) $1,6 \times 10^{-10}$ [Pollock и др., 1983].

4. Заключение

За последние 20 лет достигнут значительный прогресс в разработке генераторов оптического диапазона и в измерении генерируемых частот. На рис. 1 даны современные характеристики стабильности ряда лазеров.

Техника накопления и охлаждения атомов и ионов дает перспективу повышения точности стандартов частоты в видимом диапазоне и расширения этого диапазона в область более высоких частот [Wineland, 1986]. В ближайшее время можно ожидать значительного совершенствования этих генераторов, особенно по мере разработки лазерных диодов и связанных с ними методов.

ТАБЛИЦА I — Значения лазерных частот, рекомендованных СИРМ в 1983 году для реализации метра

Лазер	Частота [ТГц]	Относительная погрешность (3σ)
HeNe лазер, стабилизированный с помощью поглощающей ячейки на CH_4 (переход ν_3 , P(7), компонента F_2^2)	88,376 181 608	$\pm 1,3 \times 10^{-10}$
Лазер на красителе (или HeNe лазер с удвоением частоты), стабилизированный с помощью поглощающей ячейки на $^{127}\text{I}_2$ (переход 17-1, P(62), компонента o)	520,206 808 51	$\pm 6 \times 10^{-10}$
HeNe лазер, стабилизированный с помощью поглощающей ячейки на $^{127}\text{I}_2$ (переход 11-5, R (127), компонента i)	473,612 214 8	$\pm 10 \times 10^{-10}$
HeNe лазер, стабилизированный с помощью поглощающей ячейки на $^{127}\text{I}_2$ (переход 9-2, R (47), компонента o)	489,880 355 1	$\pm 11 \times 10^{-10}$
Ag ⁺ лазер, стабилизированный с помощью поглощающей ячейки на $^{127}\text{I}_2$ (переход 43-0, P (13), компонента a _s)	582,490 603 6	$\pm 13 \times 10^{-10}$

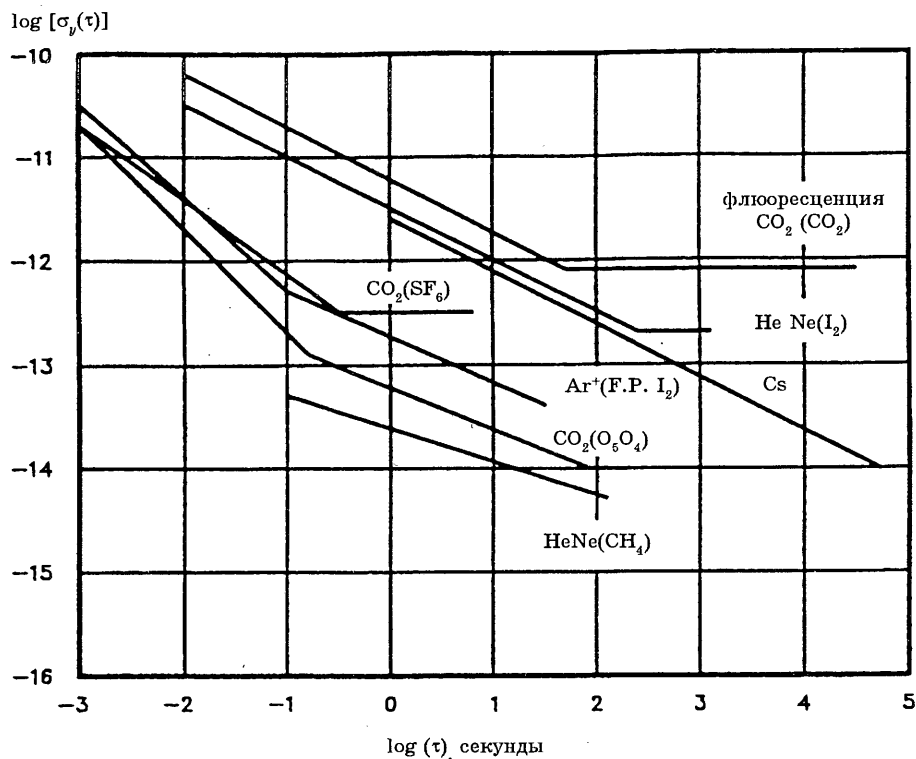


РИСУНОК 1 — Нестабильность частоты различных синхронизированных генераторов

Нестабильность частоты характеризуется двухвыборочной дисперсией.

Отчет 364 дает соответствующую информацию для микроволновых генераторов.

ССЫЛКИ

- AKIMOTO, Y. [1987] A transportable methane stabilized HeNe laser. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-36, 633.
- AKIMOTO, Y. and FELDER, R. [1989] International intercomparison of a methane stabilized HeNe laser, *Metrologia* (готовится к изданию); см. также AKIMOTO [1987].
- БАГАЕВ С.Н., БОРИСОВ Б.Д., ГОЛЬДОРТ В.Г., ГУСЕВ А.Ю., ДИЧКОВ А.С., ЗАХАРЬЯШ В.Ф., КЛЕМЕНТЬЕВ В.М., НИКИТИН М.В., ТИМЧЕНКО В.А., ЧЕБОТАЕВ В.П., ЮМИН В.В. [май—июнь 1983] Оптический стандарт времени. *Автоматизация, 3*, 37—58; *Автоматическое управление и измерение, 3*, 31—49.
- BAGAEV, S.N., CHEBOTAIEV, V.P., DYCHKOV, A.S. and MALTSEV, S.V. [1981] Supernarrow resonances in methane on F-line of the P(7) transition of the V_3 band and their application in optical frequency standards. *Journal de Physique, Colloque C-8*, suppl. No. 12, Vol. 42.
- БАГАЕВ С.Н., КЛЕМЕНТЬЕВ В.М., ЧЕБОТАЕВ В.П. [1987] Измерения абсолютной частоты HeNe/CH₄ лазера (Measurements of the absolute frequency of HeNe/CH₄ laser). *Письма ж. эксп. теор. физ.*, том 45, 67—69; англ. перевод в: *JETP Lett.*, Vol. 45, 83—86.
- BARGER, R.L. and HALL, J.L. [1969] Pressure shift and broadening of methane line at 3,39 μ m studied by laser-saturated molecular absorption. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 22, 4—8.

- БАСОВ Н.Г., ГУБИН М.А., НИКИТИН В.В., НИКУЛЬЧИН А.В., ПРОЦЕНКО Т.Д., ТЮРИКОВ Д.А., ШЕЛКОВНИКОВ А.С. [1987] Перевозимый стандарт оптической частоты и результаты его метрологических поверок (Transportable optical frequency standard and results of its metrological tests). *Квантовая электроника* (Москва), т. 14, 866—868; англ. перевод: *Sov. J. Quant. Electron.*, том 17, 545—547.
- BRADLEY, C.L., SOOHOO, K.L. and FREED, C. [1986] Absolute frequencies of lasing transitions in nine CO₂ isotopic species. *IEEE J. Quant. Elect.*, Vol. QE-22(2), 234—267.
- CIPM [1983] 17ème Conférence Générale des Poids et Mesures. Comptes rendus, 114 pages. См. также: Documents concerning the new definition of the metre. *Metrologia*, (1984) 19, 163—178.
- CLAIRON, A., DAHMANI, B., FILIMON, A. and RUTMAN, J. [1985] Precise frequency measurements of CO₂/OsO₄ and HeNe/CH₄ stabilized lasers. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-34, 265.
- CLAIRON, A., DAHMANI, B., ACEF, O., GRANVEAUD, M., DOMNIN, Y.U.S., PUSHKIN, S.B., TATARENKOV, V.M. and FELDER, R. [1988] Recent experiments leading to the characterization of the performances of portable HeNe (CH₄) lasers. Part II: Results of the 1986 LPTF absolute frequency measurements. *Metrologia*, Vol. 25, 9—16.
- DOUGLAS, N.G. [1989] Millimetre and sub-millimetre wavelength lasers. *Springer Series in Optical Sciences*, Vol. 61.
- EVENSON, K.M., WELLS, J.S., PETERSEN, F.R., DANIELSON, B.L. and DAY, G.W. [1973] Accurate frequencies of molecular transitions used in laser stabilisation: the 3,39 μm transition in CH₄ and the 9,33 and 10,18 μm transitions in CO₂. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 22, 192—195.
- EVENSON, K.M., WELLS, J.S., MATARRESE, L. M. and ELWELL, L.B. [1970] Absolute frequency measurements on the 28 and 78 μm CW water vapour laser lines. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 16, 159—162.
- GODONE, A., BAVA, E. and NOVERO, C. [1987] High resolution frequency measurement of the $^3\text{P}_1$ — $^3\text{P}_0$ ^{24}Mg transition. *Metrologia*, Vol. 24, 133—138.
- GUELACHVILI, G. and NARAHARI RAO, K. [1986] Handbook of infrared standards; with spectral maps and transition assignments between 3 and 2600 μm . Academic Press.
- HOCKER, L.O., SOKOLOFF, D.K., DANEU, V., SZOKE, A. and JAVAN, A. [1968] Frequency mixing in the infrared and far-infrared using a metal-to-metal point contact diode. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 12, 12, 401—402.
- INGUSCIO, M., MORUZZI, G., EVENSON, K.M. and JENNINGS, D.A. [1986] A review of frequency measurements for optically pumped lasers from 0,1—8 THz. *J. Appl. Phys.*, Vol. 60, R161—R182.
- JENNINGS, D.A., EVENSON, K.M. and KNIGHT, D.J.E. [1986] Optical frequency measurements. *Proc. IEEE*, Vol. 74(1), 168—179.
- KNIGHT, D.J.E. [1986] A tabulation of absolute laser frequency measurements. *Metrologia*, Vol. 22, 251—257.
- LEE, P.L. and SKOLNICK, M.L. [1967] Saturated neon absorption inside a 6238A laser. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 10, 303.
- МАЛЬШЕВ Ю.М., ОВЧИННИКОВ С.Н., РАСТОПГУЕВ Ю.Г., ТАТАРЕНКОВ В.М. и ТИТОВ А.Н. [1980] О воспроизводимости частоты квантового репера на Е-компоненте молекулы метана (Reproducibility of the frequency of a quantum reference source stabilized by the E component of the methane molecule). *Квантовая электроника*, т.7, 3, 655—658; англ. перевод: *Sov. J. Quant. Electron.*, Vol. 10, 376—377.
- MIKI, Y. and SAKUMA, E. [1987] Frequency mixing of 50 GHz microwave and 4,25 THz FIR light by a Josephson point contact. *Japan J. Appl. Phys.*, Vol. 26, L1482—L1483.
- NOLT, I.G., RADOSTITZ, J.V., DILONARDO, G., EVENSON, K.M., JENNINGS, D.A., LEOPOLD, K.R., VANEK, M.D., ZINK, L.R., HINZ, A. and CHANCE, K.V. [1987] Accurate rotational constants of CO, HCl, and HF: spectral standards for the 0,3-to 6-THz (10 to 200 cm^{-1}) region. *J. Mol. Spectrosc.*, Vol. 125, 274—287.

- PETERSEN, F.R., BEATY, E.C. and POLLOCK, C.R. [1983] Improved rovibrational constants and frequency tables for the normal laser bands of $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$. *J. Mol. Spectrosc.*, Vol. 102, 112—122.
- POLLOCK, C.R., JENNINGS, D.A., PETERSEN, F.R., WELLS, J.S., DRULLINGER, R.E., BEATY, E.C. and EVENSON, K.M. [1983] Direct frequency measurement of transitions at 520 THz (576 nm) in Iodine and 260 THz (1,15 μm) in neon. *Opt. Lett.*, 8, 133—135.
- RICCIUS, H.D. and SIEMSEN, K.J. [1984] Point contact diodes. *Appl. Phys.*, A35, 67; Experiments with point contact diodes in the 30—130 THz frequency region. *Appl. Phys.*, A35, 177.
- SAKURAI, T. [1986] Long-term Stability of W-Ni MIM Diode as Difference Frequency Detector in the Infrared. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 25, 1604—1605.
- SIEMSEN, K.J. and WHITFORD, B.G. [1977] Heterodyne frequency measurements of CO_2 laser sequence-band transitions. *Optics Commun.*, Vol. 22, 1, 11—16.
- VANIER, J. and AUDOIN, C. [1989] The quantum physics of atomic frequency standards, Adam Hilger.
- WEBER, M.J. (Ed.) [1982] Handbook Series of laser science and technology. CRC Press Inc., Boca Raton, FL, USA.
- WEISS, C.O., KRAMER, G., LIPPHARDT, B. and GARCIA, E. [1988] Frequency measurement of a CH_4 hyperfine line at 88 THz «Optical Clock». *IEEE J. Quant. Electron.*, Vol. 24, 10, 1970—1972.
- WEISS, C.O. and SAKURAI, T. [1987] 52 order harmonic mixing to 3,7 THz using a Schottky diode. *Optics Commun.*, Vol. 62, 351—352.
- WHITFORD, B.C. [1984] Simultaneous phase-lock of five CO_2 lasers to a primary Cs frequency standard. *Appl. Phys. B.*, Vol. 35, 119—122.
- WINELAND, D. [1986] Frequency standards based on stored ions. *Proc. IEEE*, Vol. 74, 1, 147—150.
-

ОТЧЕТ 898-2*

РАБОЧИЕ ИСПЫТАНИЯ ЭТАЛОННЫХ ЧАСОВ В СИСТЕМАХ ВРЕМЕНИ

(Вопрос 8/7)

(1982—1986—1990)

1. Введение

В настоящем Отчете содержатся ответы на вопросы, поставленные Исследовательской комиссией XVIII МККТТ перед 7-й Исследовательской комиссией МККР и касающиеся рабочих характеристик и надежности эталонных часов, которые будут использоваться в цифровых системах связи. В нем также даются некоторые комментарии к Рекомендации G.811 МККТТ.

Цель раздела 2 данного Отчета — гарантировать, что вопросы были правильно поняты и ответы на них даны корректно, а также выработать, насколько это возможно, общий язык в области хранения времени и синхронизации.

Раздел 3 содержит текущие данные по надежности некоторых типов часов, используемых в таких службах, как службы эталонного времени и частоты, навигации и связи.

В разделе 4 говорится об Отчетах МККР по методам измерений, необходимым для согласования часов с общей эталонной шкалой времени UTC.

2. Термины и определения, относящиеся к характеристикам работы часов

Для облегчения понимания своих документов 7-я Исследовательская комиссия МККР включила в Отчет 730 составленный ею глоссарий, в котором приведены большинство терминов, в настоящее время широко используемых в области измерений частоты и времени, а также их определения и объяснения.

Долговременное отклонение частоты, составляющее $\pm 1 \times 10^{-11}$, которое допускается в Рекомендации G.811, почти на два порядка больше величины погрешности UTC, определенной Международным бюро мер и весов. Поэтому в настоящем контексте шкала UTC принята достаточно близкой к шкале идеальных часов.

В связи с нестационарным характером погрешностей интервала времени (TIE) реальных часов за большие периоды наблюдений ($T > 10$ дней) 7-я Исследовательская комиссия опиралась в большинстве своих работ на концепции нестабильности частоты как основного явления.

Как указывается в Рекомендации G.811 МККТ, погрешность TIE может быть представлена в виде интеграла нормализованного отклонения частоты, рассчитанного за период времени S . Если t_0 — начальное время периода S , то:

$$TIE = x(t_0 + S) - x(t_0) = \int_{t_0}^{t_0 + S} y(t) dt, \quad (1)$$

используя условные обозначения Отчета 580. Кривая, указанная штриховой линией на рис. 1/G.811, представляет среднее отклонение частоты:

$$\bar{y}_0(t_0, S) = \frac{1}{S} \int_{t_0}^{t_0 + S} y(t) dt. \quad (2)$$

* К Директору МККР обратились с просьбой довести настоящий Отчет до сведения МККТТ.

Очевидно, что это отклонение обусловлено *частотной нестабильностью* часов, а кривая долговременного усреднения — *погрешностью начальной установки частоты часов* относительно номинального значения. Погрешность начальной установки частоты часов зависит от измерительной техники, используемой для сличения часов с внешними эталонами, такими как система Logan-C или национальные службы времени и частоты. Характеристики, описывающие работу часов и другие особенности, такие как размер, вес, мощность, потребление и т. д., приведены в Отчете 364. Случайные нестабильности описаны с использованием статистических критериев, приведенных в Рекомендации 538 и Отчете 580. В этих документах время выборки, равное периоду наблюдения (S секунд), обозначено строчной греческой буквой τ .

Следующая оценка стандартной девиации TIE, основанная на компьютерных воспроизведениях [Kartaschoff, 1979] статистической модели часов, может быть использована для прогноза вероятной погрешности интервала времени часов, отрегулированных и синхронизированных на начальный момент $t = 0$, при их дальнейшей работе в режиме свободного хода:

$$(TIE)_{est} = \frac{a}{2} t^2 + t \cdot (\sigma_{y_0}^2 + \sigma_y^2(\tau = t))^{1/2}, \quad (3)$$

где:

- a — нормализованный линейный частотный сдвиг за единицу времени (старение);
- σ_{y_0} — двухвыборочная стандартная девиация для начальной установки частоты;
- $\sigma_y(\tau)$ — двухвыборочная стандартная девиация, характеризующая случайную нестабильность частоты часов.

Допускается, что параметры, характеризующие часы, не изменяются во времени и что погрешность начальной установки частоты и последующие случайные флуктуации частоты статистически независимы. Как видно из формулы (3), в большинстве случаев будет преобладать погрешность начальной установки частоты часов.

3. Надежность часов

3.1 Общие положения

Надежность прибора является математической вероятностью того, что он будет функционировать в рамках определенных технических требований до некоторого времени t . Традиционная мера надежности электронных приборов — (средне)статистическое «среднее время наработки на отказ» (MTBF).

Оценка MTBF требует сбора данных за много «приборо-лет» для получения подходящей статистики. Эти данные могут быть получены с помощью большой группы работающих часов, как это описано в § 3.3. Однако статистика MTBF не учитывает характеристики надежности атомных часов в зависимости от времени. В § 3.2 показано, что цезиевые часы из ансамбля тщательно обслуживаемых часов, которые находились в работе более года, оказались более надежными, чем новые. Это может быть обусловлено старением или износом некоторых частей, таких как пучковая трубка или оптический блок. В § 3.3 рассматривается, почему эта характеристика не была обнаружена в большой группе часов при совместной работе.

В работе [Persival и Winkler, 1975] были введены две характеристики надежности атомных часов — «средний период жизни» (ML) и «полупериод жизни» (HL). Для определения статистики «среднего периода жизни» требуется отказ всех часов в составе испытываемой группы часов, что существенно ограничивает возможность ее использования для определения характеристик надежности атомных часов. Однако, если функция интенсивности отказов может быть определена гипотетически, исходя из имеющихся данных, тогда может быть вычислена и статистика «среднего периода жизни». Статистика «полупериода жизни» более пригодна для характеристики надежности атомных часов. Эта статистика имеет простую вероятностную интерпретацию: вероятность того, что часы будут работать до времени «полупериода жизни», равна 50%. Оценку этого времени можно получить после отказа половины часов из испытываемой группы.

Наилучший статистический критерий для расчета коэффициентов надежности — это вероятность того, что часы, проработав время t , могут выйти из строя ко времени $t + \Delta t$. Если часы после первого отказа более не подвергаются оценке надежности, функция стандартной интенсивности отказов может быть определена как:

$$Z(t) \Delta t = - \left[\frac{N(t + \Delta t) - N(t)}{N(t)} \right], \quad (4)$$

где $N(t)$ — число часов, которые, как ожидается, будут работать в момент времени t , а $N(0)$ — число часов, первоначально находившихся в составе данного ансамбля.

При тех же условиях $Z(t)$ может описываться выражением

$$Z(t) = - \left[\frac{\Delta N'(t)}{N'(t) \Delta t} \right], \quad (5)$$

где $N'(t)$ — число часов, которые работали в момент времени t и либо отказали на интервале от t до $t + \Delta t$, либо продолжали работать в момент времени $t + \Delta t$, а $\Delta N' = N'(t + \Delta t) - N'(t)$.

Если часы, которые вышли из строя, были исправлены и вновь введены в эксплуатацию, тогда $Z(t)$ может быть представлена следующим образом:

$$Z(t) = \frac{F}{U}, \quad (6)$$

где:

F — число отказов в течение данного интервала времени;

U — число работающих часов в течение того же интервала времени.

Считается, что небольшой концептуальной разницей между двумя функциями $Z(t)$, определенными выше, можно пренебречь.

$Z(t)$ может быть смоделирована с помощью довольно простых функций для ограниченных областей t .

$Z(t) = c$, где c — константа, относящаяся к экспоненциальному закону распределения вероятности. Она используется для описания таких явлений, как долговечность электронной трубки и т. д. Случаи отказа рассматриваются как случайные выборки, которые поэтому не зависят от срока службы. В этом случае МТБФ, по оценкам, может быть равной полупериоду жизни t_{HL} .

$Z(t) = kt$, где k — константа; предполагается, что стандартная интенсивность отказов увеличивается со временем. Эта модель, как представляется, характеризует интенсивность отказов коммерческих цезиевых пучковых часов после того, как они проработали несколько лет, но не полный срок службы.

3.2 Наблюдения за тщательно обслуживаемым ансамблем цезиевых часов

Стандартная интенсивность отказов (по состоянию на январь 1970 года) ансамбля часов в Военно-морской обсерватории США приблизительно описывалась функцией $Z(t) = kt$, где $k = 0,1$. Большинство из этих часов — промышленные приборы, проработавшие свыше одного или двух лет. В таблице I указаны «средний период» и «полупериод жизни» для различных моделей $Z(t)$.

В таблице II дается оценка $Z(t)$ для ансамбля часов Военно-морской обсерватории США, состоящего из часов двух различных серийных моделей, некоторые из которых сняты с производства.

ТАБЛИЦА I — «Средний период» и «полупериод жизни» для различных моделей $Z(t)$
($Z(t)$ в год)

	$Z(t) = c$		$Z(t) = kt$
	$c = 0,1$ 6,93	$c = 0,3$ 2,31	$k = 0,1$ 3,72
t_{HL} (годы)			
t_{ML} (годы)	10,00	3,33	3,96

ТАБЛИЦА II — Оценка $Z(t)$, основанная на ансамбле часов USNO

$(Z(t)\Delta t$ при $\Delta t = 1$ год — вероятность выхода часов из строя в следующем году при условии, что они уже работают t лет)

t	$Z(t)\Delta t$ при $\Delta t = 1$ год
0,0	$0,31 \pm 0,03$
0,5	$0,24 \pm 0,04$
1,0	$0,19 \pm 0,04$
1,5	$0,20 \pm 0,04$
2,0	$0,21 \pm 0,05$
2,5	$0,20 \pm 0,05$
3,0	$0,36 \pm 0,07$
3,5	$0,46 \pm 0,08$
4,0	$0,47 \pm 0,11$

3.3 Надежность работающих часов

Приводятся данные по технической надежности следующих приборов:

- цезиевые часы,
- рубидиевые часы,
- генераторы с кварцевой стабилизацией частоты.

Некоторые другие приборы, перечисленные в Отчете 364, здесь не рассматриваются по таким различным причинам, как продолжающиеся исследования, наличие весьма ограниченного числа приборов, отсутствие данных по надежности и т. д., что в настоящее время ограничивает пригодность этих приборов для системных применений в широком масштабе.

На основе предельных значений технических характеристик, указанных в Рекомендации G.811 МККТТ, используемые критерии отказов подразделяются на два класса.

Кварцевые и рубидиевые часы требуют начальной установки частоты и последующего контроля от внешнего эталона для компенсации сдвига частоты. Неправильная регулировка и отсутствие контроля, приводящие к нарушению характеристик, не могут рассматриваться как отказ этих приборов.

Цезиевые часы имеют систематическую погрешность, которая ниже ограничения, указанного в Рекомендации G.811 МККТТ ($\pm 1 \times 10^{-11}$), и в общем пренебрежимо малый сдвиг частоты. Поэтому выход за указанные пределы считается отказом.

За исключением вышеуказанных различий, другие отказы, такие как ухудшение качества работы и потеря выходного сигнала, являются общими для всех приборов.

Исследование проблемы надежности с помощью анкет, разосланных пользователям и производителям различных стран через представителей соответствующих администраций, началось в январе 1981 года. Эти представители собрали заполненные анкеты, проверили и, в случае необходимости, откорректировали их, а затем направили Председателю Временной рабочей группы 7/5 для дальнейшей обработки. Результаты, представленные в настоящем Отчете, основаны на данных, полученных до октября 1983 года. До указанного срока отчеты были получены из следующих стран: Китайской Народной Республики, Федеративной Республики Германии, Соединенных Штатов Америки, Франции, Италии, Японии, Нидерландов, Швеции, Швейцарии и Соединенного Королевства. Общее количество приборов, о которых сообщалось в полученных анкетах, составило 4125, в числе которых 1230 цезиевых часов, 225 рубидиевых часов и 2670 кварцевых генераторов.

Большинство данных охватывает 11-летний период с 1970 по 1980 годы.

При обработке данных были использованы следующие общие процедуры:

Листки были сгруппированы по моделям с указанием фирмы-производителя, например: HP 5061A (Cs), R&S XSRM (Rb), B 5400 (Xtal), и т. д.

Отчеты производителей рассматривались отдельно от отчетов пользователей.

Для каждой модели были определены и рассчитаны следующие данные:

ΣU — сумма всех приборов за количество лет работы каждого прибора.

ΣF — суммарное число отказов, имевшихся место у этих приборов.

Затем было вычислено отношение $\Sigma U / \Sigma F = MTBF$ (в годах) как оценка, предполагающая постоянную интенсивность отказов в течение 11-летнего периода наблюдений.

Имеются несколько причин, по которым функция стандартной интенсивности отказов, определенная в § 3.1, не может быть оценена с погрешностью, меньшей, чем погрешность в оценке величины $MTBF$, упомянутая выше. Существуют большие различия в сроке службы и конструкции модели; кроме того, для получения большой статистической выборки данные были взяты из всех имевшихся источников за 11-летний период, включая часы, которые имели отказы, но были исправлены, а затем, возможно, вновь выходили из строя один или несколько раз.

Также существует большой разброс в сообщенных значениях среднего времени ремонта отказавшего прибора, включая время перевозки ($MTTR$). Поскольку среднее время ремонта колеблется между 80 и 140 сутками при значительной зависимости от географического положения пункта, где установлен прибор, наиболее показательным средним значением $MTTR$ для цезиевых и рубидиевых часов являются 90 суток. Для кварцевых часов данные $MTTR$ не приводятся.

В таблицах III, IV и V даны результирующие оценки $MTBF$, основанные на имеющихся данных.

ТАБЛИЦА III — Цезиевые часы

Модель (год)	ΣU	ΣF	$MTBF$ (годы)	$MTTR$ (сутки)	Количество исследуемых приборов
<i>Отчеты пользователей</i>					
HP5061A (1968)	3347	823	$4,07^{+0,69}_{-0,52}$	90	492
OSA 3200 (1975/76)	96	32	$3,0^{+0,6}_{-0,4}$	90	25
HP5061A-004 (1973)	118	44	$2,68^{+0,41}_{-0,31}$	90	24
HP5060A ⁽¹⁾ (1965)	133	42	3,17	90	21
OSA 3000 (1976)	29	10	$2,9^{+0,9}_{-0,6}$	90	14
HP5062 ⁽¹⁾ (1973)	1648	319 ⁽²⁾	$5,2^{+1,0}_{-0,7}$		408
<i>Отчеты производителей (см. комментарии в § 3.3)</i>					
OSA 3000 (1976)	285	30	9,6	35	97
OSA 3200 (1975)	679	161	4,22	50	149

⁽¹⁾ Старая модель, снята с производства.

⁽²⁾ Для данного типа часов учитываются только отказы цезиевых пучковых трубок и другие отказы, связанные с отказами цезиевых пучковых трубок.

ТАБЛИЦА IV — Рубидиевые часы

Модель (год)	ΣU	ΣF	MTBF (годы)	MTTR (сутки)	Количество исследуемых приборов
HP5065A (1970)	159	21	7,6	120	31
FRT/FRK (1973)	584	52	11,2	90	159
XSRM (1972)	71	13	5,5	90	15
P01 (1976)	44	41	1,08	—	20

ТАБЛИЦА V — Кварцевые часы

Модель	Первый год	ΣU	ΣF	MTBF (годы)	Количество исследуемых приборов	Приме- чания
<i>Отчет пользователя</i>						
B5400	1974	48	1	48	11	
B1250	1973	8	1	8	1	(¹)
B1010	1965	926	25	37	132	(¹)
HP104/105	1970	46	4	11,5	5	(²)
R&S XSC/D/S	1970	136	13	10,5	15	(²)
C60MCS	1972	223	1	200	52	
CP12MCS	1970	6316	33	191	1288	
MT	1975	834	13	64	139	
K	1975	1353	2	200	235	
<i>Отчет производителя</i>						
OSA B5400	1974	1352	27	50	318	
OSA B1250	1970	214	3	71	20	(¹)
HCD HCD50	1970	4383	104	42	587	

(¹) Устаревшая модель, снята с производства.

(²) Приборы объединены в одну группу из-за большого сходства конструкций и отсутствия явных отличий.

В таблице III доверительный интервал 1σ дан для оценок MTBF. Эти интервалы были вычислены следующим образом.

Были использованы данные по наибольшей совокупности приборов (НР5061А, 492 исследуемых прибора). Путем добавления колонок для каждого года были получены последовательности числа работающих приборов ($\sum U_i$) и числа отказов ($\sum F_i$). Затем была вычислена последовательность значений отношения

$$Z_i = \frac{\sum F_i}{\sum U_i}$$

для каждого года (с 1970 по 1980 гг.), как показано ниже, в таблице VI. Z_i — оценка ежегодной интенсивности отказов для всей совокупности различных приборов с разными сроками службы, причем число приборов в этой совокупности растет, поскольку в эксплуатацию вводится больше новых приборов, чем изымается старых. Испытания показали, что эти значения Z_i распределены по статистике нормального распределения. Среднее значение [медиана] Z_m равно 0,22 со стандартной девиацией $\sigma_z = \pm 0,094$. Таким образом, вероятная относительная погрешность среднего значения составляет около $\pm 6\%$. Величина, обратная этому среднему значению, $Z_m^{-1} = 4$ года, приближается к оценке MTBF (4,07 лет), приведенной в таблице III, в которой доверительные интервалы были вычислены с использованием вышеупомянутой 12,5% оценки вероятной относительной погрешности при средней интенсивности отказов $1/4,07 = 0,246$.

Доверительные интервалы других моделей были вычислены аналогичным образом. Данные по НР5060А представляют исключительно исторический интерес. По данным, приведенным в таблицах IV и V, не было сделано подобных оценок. В таблице IV слишком мала численность приборов в совокупностях, а указанные в таблице V приборы довольно разнородны; некоторые из них имеют высокие значения MTBF.

В таблице VII показано распределение отказов среди различных подгрупп ансамблей цезиевых часов на основе отчетов пользователей и производителей. Данные по приборам НР взяты из [Jonson и др., 1980].

Необходимо дать комментарий по вопросу расхождений между отчетами пользователя и производителя, особенно в таблице III. Можно быть уверенным в том, что производитель сделал все возможное, чтобы отчет был объективным, а цифры достоверными. Однако всегда есть какие-то пользователи, которые сами производят ремонт в случае небольших отказов у имеющихся у них средств, не уведомив о своих действиях производителя. Поэтому некоторые расхождения практически неизбежны. Совершенствование цепи обратной связи в отношении отказов и ремонта послужило бы интересам как производителей, так и пользователей.

Собранные к настоящему моменту времени данные охватывают лишь часть общего количества точных часов в мире. Пика отказов в первый год работы цезиевых часов не наблюдалось, то есть «ранние отказы», по-видимому, устранялись производителями в процессе приработка аппаратуры.

ТАБЛИЦА IV

Год	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980
$\sum U_i$	51	70	104	162	204	255	291	328	349	370	386
$\sum F_i$	7	24	19	16	32	36	48	54	67	95	118
Z_i	0,137	0,343	0,183	0,099	0,157	0,141	0,165	0,165	0,192	0,257	0,306

ТАБЛИЦА VII — Цезиевые пучковые часы

Модель: HP5061A — OSA B3200 — HP5061A-004 — HP5602A — OSA 3000

Модель	Резонатор с атомным пучком	Кварцевые генератор	Цепи частотного управления	Цепи следающих систем	Выходные цепи	Внутренний источник питания	Другие узлы	ΣU (ΣF) ⁽¹⁾
<i>Отчет пользователя</i>								
HP5061A								
F_i	175	72	97	50	12	68	28	3347
%	35	14	19	10	2	14	6	(502)
OSA B3200								
F_i	38	4	0	0	8	40	15	96
%	36	4	0	0	8	38	14	(105)
HP5061A-004								
F_i	16	9	4	4	1	2	4	118
%	40	23	10	10	3	5	10	(40)
HP5602A								
F_i	213	46	41	88	69	228	102	1648
%	27	6	5	11	9	29	13	(787)
<i>Отчет производителя</i>								
HP5061 ⁽²⁾								
5061-004 F_i	62	17	44	21	40	11	4	(194)
5062C %	32	9	23	11	20	3	2	
OSA 3200 F_i	20	21	15	15	9	83	1	679
%	12	13	9	9	5	51	1	(164)
OSA 3000 F_i	8	8	1	3	1	3	6	289
%	27	27	3	10	3	10	20	(30)

⁽¹⁾ Обычно больше, чем ΣF , указанное в таблице III, из-за многократных одновременных дефектов.⁽²⁾ Информации о количестве приборов нет.

3.4 Квалификационные и приемочные испытания

Для каждого типа прибора «часы/стандарт частоты» должны быть установлены *квалификационные испытания характеристик конструкции*, которые определяют предельные режимы работы в условиях внешней среды, эквивалентных экстремальным условиям, которые могут встретиться при эксплуатации. Также должны быть определены предельные режимы для случая, когда все предельные значения возникают одновременно. В перечень таких испытаний на воздействие внешней среды должны быть включены (но не ограничиваться ими):

Температура
Вибрации
Толчки
Переменные магнитные поля
Статические магнитные поля
Наведенные радиочастотные помехи
Излучаемые радиочастотные помехи
Атмосферное давление
Влажность

Измерение влияния условий внешней среды на показатели работы высокоточных коммерческих цезиевых часов было выполнено с использованием вакуумной камеры, разработанной для этих целей. Относительное изменение показателей работы, обусловленное изменениями температуры (на 1°C : $24\text{--}31^{\circ}\text{C}$), абсолютной влажности (на 1 гм^{-3} : $7\text{--}18\text{ гм}^{-3}$), атмосферного давления (на 100 мбар: $673\text{--}1007\text{ мбар}$ ($100\text{ мбар} = 10^4\text{ Па}$)) и геомагнитного поля (на 100 мЭ: между -135 и 135 мЭ ($100\text{ мЭ} = 8\text{ Ам}^{-1}$)), оказалось менее чем $\pm 2 \times 10^{-14}$ со средней вычисленной погрешностью порядка 10^{-15} . Эти результаты для одиночных цезиевых часов показывают, что эффекты вышеупомянутых воздействий окружающей среды не являются пренебрежимо малыми и что условия внешней среды должны тщательно контролироваться для обеспечения как можно более стабильной работы атомных часов [Iijima и др., 1978]. Были проведены дальнейшие измерения влияния влажности [Вава и др., 1987], которые дали для цезиевых стандартов величину зависимости $\pm 5 \times 10^{-14}\text{ гм}^{-3}$.

Однако следует отметить, что отдельные значения не могут быть обобщены в виде коэффициентов чувствительности. Они неодинаковы в различных часах и даже не являются фиксированными для отдельных часов, поскольку зависят от диапазона и скорости изменений параметров.

Как только для данной конструкции будут определены такие пределы, должны быть установлены *уровни для проведения приемочных испытаний*. Следует оговорить, что каждый поставленный прибор должен испытываться в рамках этих предельных режимов.

Для устранения скрытых *производственных* дефектов приборов до их поставки пользователю каждый прибор должен быть испытан на вибрации по всем трем осям с продолжительностью тряски не менее 2 мин по каждой оси. Далее, он должен быть подвергнут пяти циклам крайних температурных перепадов (продолжительность испытаний для каждого крайнего значения температуры не менее 4 часов), а также проверен в течение одной недели работы на стабильность предельных характеристик.

3.5 Непрерывность работы

В большинстве областей применения стандартов частоты и времени, особенно в области связи, установлены строгие требования к непрерывности работы, что требует дублирования приборов для защиты от отказов в процессе эксплуатации. В Национальной физической лаборатории был изготовлен усреднитель частоты на основе получившей дальнейшее развитие работы [McLeod и Wise, 1975]. Это устройство обеспечивает выходную частоту, которая является средневзвешенной величиной от пяти входных частот, при этом величина весового коэффициента каждой входной частоты может изменяться от 0 до 5 с шагом в единицу. Применяется автоматическая компенсация любых изменений весовых коэффициентов и увеличения или уменьшения числа входных частот. Усреднитель является системой с резервированием и в результате может стать чрезвычайно надежным источником для каналов связи. Более того, улучшение стабильности частоты усредненного выходного сигнала по сравнению с любым входным сигналом может оказаться очень выгодным для некоторых применений.

Существуют и другие возможности обеспечения непрерывной работы, такие, как использование синхронизированных ведомых генераторов с памятью в контрольной системе.

3.6 Выводы

Исследование надежности точных часов, описанное в § 3.3, дало некоторые интересные результаты. Оценки величины МТВГ для цезиевых, рубидиевых и кварцевых часов подтвердили старое правило, что МТВГ обратно пропорционально сложности прибора. Однако наиболее сложный прибор имеет наивысшую стабильность частоты, и поэтому он может требовать меньшего контроля и технического обслуживания (например, регулировки частоты) в процессе эксплуатации системы. Следует также четко представлять себе, что любая статистика, основанная на анализе весьма разнородных источников и условий их эксплуатации, имеет ограничения и подвержена возможным ошибкам.

Таблицы III и IV также показывают важность производственного опыта для повышения надежности. 100% контроль деталей и приработка приборов являются весьма удачными мерами для сведения к минимуму так называемых «ранних отказов». Некоторые внутренние скрытые недостатки могут проявляться только после нескольких лет работы в полевых условиях. В этой связи уровень надежности, достигнутый цезиевыми пучковыми стандартами, является выдающимся.

4. Методы измерений

Измерения являются единственным средством обеспечения соответствия техническим требованиям. Современные сравнительные методы передачи и распределения сигналов времени и стандартных частот даны в Отчетах 363 и 518.

Все кварцевые, рубидиевые и цезиевые часы требуют поверки для обеспечения правильной работы. Кварцевые и рубидиевые часы требуют периодической калибровки и регулировки частоты; цезиевые часы, в соответствии с указанными в Рекомендации МККТТ G.811 допусками на частоту, не требуют подобных регулировок. Однако долговременные сравнения с другими эталонами служат существенным фактором надежности для обнаружения отказа.

Основной проблемой при измерениях времени часов на больших расстояниях является неопределенность задержки передачи, которая обычно определяет выбор метода сравнения. Хотя синхронизм в протяженной сети возможен и желателен, тот факт, что задержки передачи не очень стабильны, поднимает вопрос об уровне точности, который должен быть обеспечен. Влияние изменений в задержке передачи в основном может быть устранено за счет двусторонних сравнений сигналов времени. Подобные сравнения могут быть относительно легко проведены с помощью обычных синхросигналов дуплексных цифровых линий связи, то есть линий, обеспечивающих связь в обоих направлениях. Благодаря этому становится возможным обеспечить очень точные измерения погрешностей синхронизации для использования в работе цифровых сетей связи.

Разработчик цифровой системы связи может столкнуться с необходимостью выбора из нескольких вариантов. Часы в системе могут сравниваться с единичными первичными часами, которые, в свою очередь, сравниваются со шкалой UTC. Протяженная система может быть подразделена на регионы, каждый из которых будет иметь свои первичные часы, индивидуально соотносимые со шкалой UTC. Оба варианта были с успехом испытаны в Канаде. В первом случае сетевые первичные часы сравнивались с национальным стандартом частоты, хранимым в Национальном исследовательском центре (NRC). Во втором случае несколько первичных часов были синхронизированы по фазе сигналами навигационной системы Loran-C.

Главным при выборе модели является определение степени надежности часов, то есть постоянная времени в системе контроля частоты в зависимости от качества часов [Kartashoff, 1980].

Методы сравнения через спутники продемонстрировали заложенные в них большие потенциальные возможности, особенно для районов, где не доступны другие высокостабильные сигналы времени (Отчет 518).

ССЫЛКИ

- BAVA, E., CORDARA, F., PETTTI, U. and TAVELLA, P. [December 1987] Analysis of the seasonal effects on caesium clocks to improve the long-term stability of a time scale. Proceedings of the 19th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, Redondo Beach, California, 185—202.
- IJIMA, S., FUJIWARA, K., KOBAYASHI, H. and KATO, T. [1978] Effect of environmental conditions on the rate of a caesium clock. *Ann. Tokyo Astron. Observatory*, University of Tokyo, 2nd series, Vol. 17, 1, 50—67.
- JOHNSON, A., FORCE, M. and OSTERDOCK, T. [1980] Longevity performance of caesium clocks. Proc. 34th Annual Symposium on Frequency Control, Philadelphia, Pa., USA (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703) (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).
- KARTASCHOFF, P. [September 1979] Computer simulation on the conventional clock model. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol. IM-28, 3, 193—197.
- KARTASCHOFF, P. [December 1980] Reference clock parameters for digital communications systems applications. Proc. 12th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meeting (NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md., USA), NASA CP 2175, 515—548.
- MCLEOD, N.W. and WISE, J. [1975] Clock averaging circuit. *Electron. Lett.*, Vol. 11, 18, 428—429.
- PERCIVAL, D.B. and WINKLER, G.M.R. [1975] Timekeeping and the reliability problem. Proc. 29th Annual Symposium on Frequency Control (US Army Electronics Command, Ft. Monmouth, NJ 07703) (Electronic Industries Association, Washington, DC 20006, USA).

ЛИТЕРАТУРА

- ZHUANG QI XIANG [1980] Reliability research of rubidium clock. *Ann. Shanghai Observatory*, Academia Sinica, Vol. 2.

РЕШЕНИЯ

РЕШЕНИЕ 65

СПРАВОЧНИК ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ СПУТНИКОВЫХ ПЕРЕДАЧ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

(1985)

7-я Исследовательская комиссия МККР,

УЧИТЫВАЯ

- (a) степень и глубину проводившихся Временной рабочей группой (ВРГ) 7/4 в течение двух исследовательских периодов исследований в области технических возможностей передачи и распространения времени через спутники;
- (b) что благодаря эффективности и экономичности спутниковые методы распространения времени могут найти применение в ряде развивающихся стран, желающих установить национальные эталоны времени и частоты;
- (c) что спутниковые методы распространения могут все больше и больше дополнять и заменять некоторые из существующих наземных служб передачи стандартных частот и сигналов времени;
- (d) что службой времени и частоты, работающей с метеорологическими спутниками GOES, накоплен многолетний опыт работы;
- (e) что использование геостационарной спутниковой орбиты региональными системами связи, то есть системами ARABSAT, BRAZILSAT, INSAT, PALAPA и т.д., обеспечивает технические возможности для добавления канала передачи времени и частоты с небольшой полосой частот;
- (f) что с появлением прямого спутникового телевизионного вещания аналогичным образом расширятся возможности для включения эталона времени в уже существующую систему контроля времени;
- (g) что Резолюция 33 по техническому сотрудничеству поддерживает подготовку справочника,

ПОСТАНОВЛЯЕТ,

1. что должна быть сформирована Специальная рабочая группа с целью подготовки текста справочника по спутниковым службам передачи времени и частоты;
2. что сначала этот справочник должен быть составлен на основе текстов 7-й Исследовательской комиссии, но в него должна войти и соответствующая документально подтвержденная информация из текстов ВРГ 7/4 и 2, 4, 8, 10 и 11-й Исследовательских комиссий, а также из обширной литературы по системам навигации и определения местоположения с помощью спутников;
3. что следует поощрять администрации к тому, чтобы они представляли для включения в справочник конкретные материалы в тех областях, в которых они накопили специальные знания и опыт;
4. что должен быть назначен координатор, который будет осуществлять контроль за всем процессом сбора и интеграции представленных материалов;
5. что цель координатора и всех тех, кто представит материалы, — завершить подготовку текста справочника до начала XVII Пленарной Ассамблеи.

В конце XVI Пленарной Ассамблеи (1986 г.) следующие администрации и международные организации заявили о своем участии в работе Специальной рабочей группы:

Администрации:

Австрия
Канада
Соединенные Штаты Америки
Франция
Индия
Япония
Соединенное Королевство
Социалистическая Федеративная Республика Югославия

Международные организации:

Международное бюро мер и весов

Координатор Специальной рабочей группы:

Дж. СТИЛ
National Physical Laboratory
TEDDINGTON
Middlesex TW11 OLW
United Kingdom

Телефон: + 44 1 977 3222
Телекс: 262 344 NPL G

