



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.

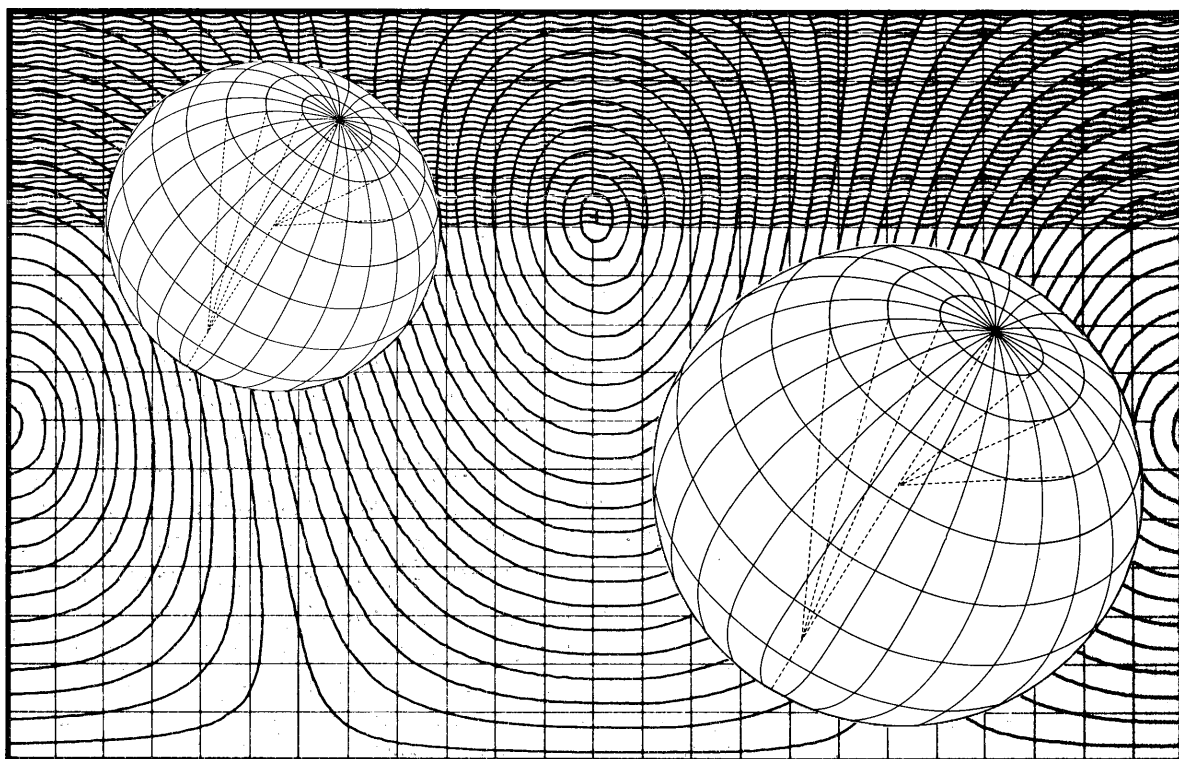
(ITU) للاتصالات الدولي الاتحاد في والمحفوظات المكتبة قسم أجراه الضوئي بالمسح تصوير نتاج (PDF) الإلكترونية النسخة هذه والمحفوظات المكتبة قسم في المتوفرة الوثائق ضمن أصلية ورقية وثيقة من نقلًا.

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.



COMITÉ CONSULTATIF INTERNATIONAL DES RADIOCOMMUNICATIONS
INTERNATIONAL RADIO CONSULTATIVE COMMITTEE
COMITÉ CONSULTIVO INTERNACIONAL DE RADIOCOMUNICACIONES



ATLAS CCIR DES CARACTÉRISTIQUES IONOSPHERIQUES

CCIR ATLAS OF IONOSPHERIC CHARACTERISTICS

ATLAS CCIR DE LAS CARACTERÍSTICAS IONOSFÉRICAS

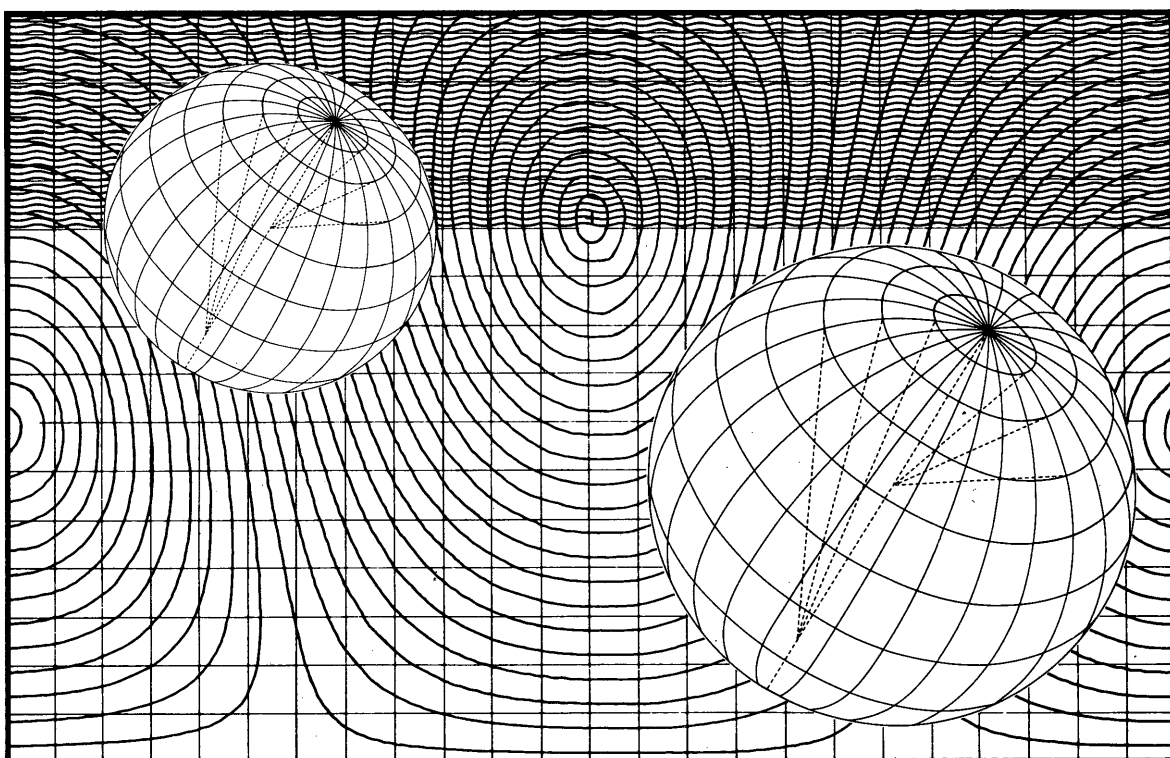


UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS
INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION
UNIÓN INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES

Genève, 1988



COMITÉ CONSULTATIF INTERNATIONAL DES RADIOCOMMUNICATIONS
INTERNATIONAL RADIO CONSULTATIVE COMMITTEE
COMITÉ CONSULTIVO INTERNACIONAL DE RADIOCOMUNICACIONES



ATLAS CCIR DES CARACTÉRISTIQUES IONOSPÉRIQUES

CCIR ATLAS OF IONOSPHERIC CHARACTERISTICS

ATLAS CCIR DE LAS CARACTERÍSTICAS IONOSFÉRICAS

PRÉAMBULE

Le Rapport 340-5 (Dubrovnik, 1986), adopté à l'unanimité, est constitué*:

- a) du matériel faisant l'objet de cette publication,
- b) des figures représentées aux pages 86 à 373 et 377 à 388 du Rapport 340-4 (Genève, 1983) qui n'ont pas été reproduites dans cette publication.

* Les versions précédentes de l'Atlas, maintenant remplacées, comprenaient:

- le Rapport 340 (Oslo, 1966),
- le Supplément N° 1 au Rapport 340 (Genève, 1971),
- le Supplément N° 2 au Rapport 340 (Genève, 1975),
- le Supplément N° 3 au Rapport 340 (Genève, 1980).

Toutes ces versions sont supprimées.

PREAMBLE

Report 340-5 (Dubrovnik, 1986), adopted unanimously, consists of*:

- a) the material presented in this publication,
 - b) the Figures given on pages 86-373 and 377-388 of Report 340-4 (Genève, 1983) which have not been reproduced in this publication.
-

* Earlier versions of the Atlas comprised:

- Report 340 (Oslo, 1966),
- Supplement No. 1 to Report 340 (Geneva, 1971),
- Supplement No. 2 to Report 340 (Geneva, 1975),
- Supplement No. 3 to Report 340 (Geneva, 1980).

These versions have all been superseded.

PREÁMBULO

El Informe 340-5 (Dubrovnik, 1986), adoptado por unanimidad, consta de*:

- a) el material presentado en esta publicación,
 - b) las figuras incluidas en las páginas 86 a 373 y 377 a 388 del Informe 340-4 (Ginebra, 1983), que no se reproducen en la presente publicación.
-

* Antiguas versiones del Atlas incluidas:

- Informe 340 (Oslo, 1966),
- Suplemento N.º 1 al Informe 340 (Ginebra, 1971),
- Suplemento N.º 2 al Informe 340 (Ginebra, 1975),
- Suplemento N.º 3 al Informe 340 (Ginebra, 1980).

Todas estas versiones han sido suprimidas.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
Partie 1. — Généralités	7
Partie 2. — Cartes numériques et diagrammes de prévision de la couche F2	8
Partie 3. — Prévision de foE et de la MUF de référence de la couche E	14
Partie 4. — Prévision de foF1 et de la MUF de référence de la couche F1	17
Partie 5. — Coefficients numériques pour foEs et fbEs	23
Partie 6. — Coefficients numériques pour le pourcentage d'occurrence de F-diffus	23
Partie 7. — Coefficients numériques pour h'F et h'F,F2	24
Partie 8. — Modèle de distribution verticale de la densité électronique dans les régions E et F	24
Partie 9. — Méthode manuelle d'évaluation de la médiane mensuelle de la MUF de référence et de la fréquence optimale de travail pour des liaisons de toute longueur	28
Partie 10. — Diagrammes pour l'évaluation de F2(ZÉRO)MUF, F2(4000)MUF et la distance zénithale du Soleil	32
Partie 11. — Méthode informatique d'évaluation des valeurs médianes mensuelles de la MUF de référence et de la fréquence optimale de travail	32
Partie 12. — Hauteur de réflexion spéculaire	34
Fig. 10 à Fig. 15	35

CONTENTS

	Page
Part 1. — General	41
Part 2. — Predicted F2-layer numerical maps and charts	42
Part 3. — Prediction of foE and E-layer basic MUF	48
Part 4. — Prediction of foF1 and the F1-layer basic MUF	51
Part 5. — Numerical coefficients for foEs and fbEs	57
Part 6. — Numerical coefficients for the percentage of occurrence of spread-F	57
Part 7. — Numerical coefficients for h'F and h'F,F2	58
Part 8. — Model of vertical distribution of electron density in the E and F regions	58
Part 9. — Manual method for estimating the monthly median basic maximum usable frequency and optimum working frequency for paths of any length	62
Part 10. — Charts for estimating F2(ZERO)MUF, F2(4000)MUF and zenith angle of the Sun	66
Part 11. — Computer method for estimating the monthly median basic MUF and optimum working frequency	66
Part 12. — Mirror-reflection height	68
Figures 10 to 15	69

ÍNDICE

	Página
Parte 1. — Generalidades	75
Parte 2. — Mapas numéricos y diagramas relativos a la capa F2 predicha	76
Parte 3. — Predicción de foE y de la MUF básica de la capa E	82
Parte 4. — Predicción de foF1 y de la MUF básica de la capa F1	85
Parte 5. — Coeficientes numéricos para foEs y fbEs	91
Parte 6. — Coeficientes numéricos para el porcentaje de aparición de la capa F difusa	91
Parte 7. — Coeficientes numéricos para h'F y h'F, F2	92
Parte 8. — Modelo de distribución vertical de la densidad electrónica en las regiones E y F	92
Parte 9. — Método manual para estimar la mediana mensual de la frecuencia máxima utilizable (MUF) básica y de la frecuencia óptima de trabajo para trayectos de cualquier longitud	96
Parte 10. — Gráficos para estimar F2(CERO)MUF, F2(4000)MUF y el ángulo cenital del Sol	100
Parte 11. — Método por computador para estimar la MUF mediana básica mensual y la frecuencia óptima de trabajo	100
Parte 12. — Altura de la reflexión especular	102
Figuras 10 a 15	103

RAPPORT 340-5

ATLAS CCIR DES CARACTÉRISTIQUES IONOSPHERIQUES

(Recommandation 434)

(1966-1970-1974-1978-1982-1986)

PARTIE 1

GÉNÉRALITÉS

1.1 Introduction

L'objet de l'Atlas des caractéristiques ionosphériques du CCIR est de présenter un recueil codifié de certaines caractéristiques fondamentales de l'ionosphère dont dépend la propagation ionosphérique des ondes radioélectriques. Notre connaissance des caractéristiques de l'ionosphère et des divers mécanismes de la propagation ionosphérique est encore loin d'être complète, aussi le présent Atlas doit-il être considéré comme provisoire. Des éditions améliorées pourront en être publiées à mesure que nous progresserons vers une meilleure compréhension de la physique de l'ionosphère et des mécanismes de la propagation ionosphérique des ondes radioélectriques.

L'Atlas des caractéristiques ionosphériques du CCIR se présente sous deux formes différentes. La première est constituée par les coefficients des fonctions représentant la cartographie numérique des caractéristiques de la couche F2, sur bande magnétique associée à des programmes qui permettent le calcul de ces fonctions et que l'on peut obtenir en s'adressant au Directeur du CCIR. Les caractéristiques de la couche E et de la couche F1 sont disponibles sous forme d'une série de formules. Cette présentation est destinée aux organismes internationaux, tels que l'IFRB, et à tous ceux qui ont à résoudre divers problèmes de propagation ionosphérique ou qui ont à effectuer régulièrement de nombreux calculs répétitifs. La présentation de l'Atlas sous cette forme permet de bénéficier des avantages (économie et précision) des techniques informatiques.

La seconde forme de l'Atlas est celle que l'on trouve dans le présent Rapport où les caractéristiques de la couche F2 sont présentées sous forme d'un ensemble de diagrammes. Ces diagrammes ont été tracés d'après les fonctions numériques que contient l'Atlas sous sa première forme. Ils sont destinés à ceux qui n'ont pas accès à un ordinateur ou qui cherchent une solution rapide et simple à des problèmes de planification à long terme.

Les caractéristiques de la couche F2 occupent une place prépondérante dans cet Atlas, parce que cette couche joue un rôle capital dans la propagation à grande distance des ondes décamétriques. De plus, la représentation adéquate des variations de la couche F2 (selon l'emplacement, l'heure de la journée, la saison et l'activité solaire) nécessite un très grand nombre de diagrammes. On a également inclus des nomogrammes et des diagrammes de la distance zénithale du Soleil pour déterminer les paramètres de la couche E normale et des nomogrammes et un diagramme de la latitude géomagnétique pour déterminer les caractéristiques de la couche F1 régulière. Ces informations sur les caractéristiques de la couche F2, de la couche F1 et de la couche E normale fournissent une base de référence utile pour les calculs de la propagation ionosphérique radioélectrique. Des informations supplémentaires sur la couche E sporadique, sur les hauteurs virtuelles minimales des couches F1 et F2 ainsi que sur le phénomène F-diffus ne sont disponibles que sous forme de coefficients numériques.

Les informations de base peuvent être appliquées pour la solution de problèmes très variés. Pour tel ou tel cas d'espèce, on devra souvent recourir à des renseignements supplémentaires provenant d'autres sources (par exemple: bruit atmosphérique radioélectrique, absorption, caractéristiques des antennes). D'un utilisateur à l'autre, la nature des problèmes à résoudre peut varier énormément, de même d'ailleurs que les méthodes de calcul retenues. Des programmes d'ordinateur sont disponibles pour la solution de nombreux problèmes de propagation ionosphérique. Certains sont signalés dans la Résolution 63 et on peut en trouver d'autres dans les publications d'un certain nombre d'administrations.

1.2 Terminologie

D'une manière générale, la terminologie utilisée ci-après est conforme aux Recommandations du World Wide Soundings Committee [Piggott et Rawer, 1972 et 1978] et à la pratique couramment suivie dans les publications spécialisées [Alpert, 1960; Davies, 1965].

Le terme «MUF d'exploitation» est la fréquence la plus élevée permettant, à un moment donné, d'assurer un service de qualité acceptable entre des stations terminales données, dans des conditions d'exploitation spécifiées (par exemple, types d'antenne, puissance de l'émetteur, classe d'émission, débit d'information et rapport signal/bruit nécessaire).

Le terme «MUF de référence» est la fréquence la plus élevée à laquelle une onde radioélectrique peut se propager entre des stations terminales données, en une occasion spécifiée, par réfraction ionosphérique exclusivement.

Le terme «carte numérique» sert à désigner une fonction $\Omega(\lambda, \theta, T)$ de trois variables: latitude λ , longitude θ et temps T , qui représente les variations mondiales, géographiques et diurnes, d'une caractéristique de l'ionosphère. Le terme «diagramme» sert à désigner la représentation graphique des variations d'une caractéristique de l'ionosphère à un moment donné, au moyen de courbes «isoparamètres» portées sur une carte géographique ou sur tout autre réseau de coordonnées. Il faut souligner que l'unique «carte numérique» sert à établir tout un jeu de diagrammes pour diverses heures exprimées en temps universel.

1.3 Prévision des indices solaires et ionosphériques

L'utilisation du présent Rapport nécessite des prévisions des indices solaires R_{12} et Φ_{12} . Des valeurs prévues et mesurées de ces indices solaires et ionosphériques sont publiées chaque mois dans les circulaires du CCIR ainsi que dans le Journal des télécommunications. Les définitions de ces indices et leur corrélation figurent dans la Recommandation 371.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AL'PERT, Ya. L. [1960] *La propagation des ondes radioélectriques et l'ionosphère* (en russe). Académie des Sciences de l'URSS.
- DAVIES, K. [1965] Ionospheric radio propagation. National Bureau of Standards Monograph 80, US Government Printing Office, Washington, DC 20402.
- PIGGOTT, W. R. et RAWER, K. [1972] *URSI Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction* (2^e édition). World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics. Report UAG-23, NOAA, Boulder, CO 80303, Etats-Unis d'Amérique. Une traduction en espagnol existe à LIARA (Argentine) et une traduction en français au CNET (France).
- PIGGOTT, W. R. et RAWER, K. [1978] *URSI Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction* (2^e édition). Révision des chapitres 1 à 4, World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics. Report UAG-23A, NOAA, Boulder, CO 80303, Etats-Unis d'Amérique.

PARTIE 2

CARTES NUMÉRIQUES ET DIAGRAMMES DE PRÉVISION DE LA COUCHE F2

2.1 Données

Les données sur lesquelles sont fondés les fonctions des cartes numériques et les diagrammes concernant la couche F2 ont été déduites de sondages ionosphériques verticaux effectués par un grand nombre de stations au sol réparties dans le monde entier. Ces stations, exploitées par des laboratoires de nombreux pays différents, appliquent des méthodes normalisées pour réduire leurs observations [Piggott et Rawer, 1972 et 1978]. Durant l'Année géophysique internationale, le nombre des stations ionosphériques a considérablement augmenté, fournissant des observations recueillies dans les nombreux emplacements nouveaux qui ont comblé certaines des vastes lacunes que comportait le réseau mondial. Il existe cependant encore bien des régions du monde, en particulier les régions océaniques, pour lesquelles on ne dispose que de peu de données, ou même aucune. Malgré ces lacunes, la couverture mondiale en stations d'observation est suffisante pour que l'on puisse obtenir une représentation raisonnable des traits principaux des variations mondiales des caractéristiques de l'ionosphère.

Les données de base utilisées pour les caractéristiques de la couche F2 présentées dans cet Atlas sont: foF2, fréquence critique du rayon ordinaire à incidence verticale pour la couche F2, et M(3000)F2, facteur numérique dont le produit par foF2 donne la MUF de référence pour une distance de 3000 km. Le facteur M(3000)F2 se déduit des ionogrammes sous incidence verticale par l'utilisation d'une courbe de transmission normalisée ou par d'autres méthodes équivalentes [Piggott et Rawer, 1972 et 1978; Davies, 1965].

D'un jour à l'autre, les deux paramètres foF2 et M(3000)F2 varient énormément autour de leurs valeurs médianes mensuelles. Ces dernières présentent par contre des variations systématiques assez régulières en fonction de l'emplacement géographique, de l'heure de la journée, de la saison et de l'activité solaire. Les cartes numériques et diagrammes concernant la couche F2 qui figurent dans le présent Atlas ont été établis à l'aide des valeurs médianes mensuelles de foF2 et de M(3000)F2 recueillies par toutes les stations ionosphériques en fonctionnement.

Les données relatives aux cinq années 1954 à 1958 ont fait l'objet d'une analyse mois par mois; cette période est typique de celle qui s'écoule entre un minimum et un maximum d'activité solaire. Les données fournies par les stations qui étaient en service pendant la période considérée ont pu être complétées par celles recueillies dans certaines stations qui ont été mises en service plus tard, ce qui a permis de combler certaines des vastes lacunes de la couverture mondiale. Ce procédé a été particulièrement utile pour 1954, année d'activité solaire minimale; en complétant les données pour 1954 par certaines données pour 1964, qui fut aussi une année d'activité solaire minimale, on a eu suffisamment de renseignements pour pouvoir tracer les cartes dans la plus grande partie de l'hémisphère Sud.

2.2 Cartographie numérique

La méthode utilisée pour mettre au point les diagrammes du présent Rapport et les cartes numériques de la couche F2 a été élaborée par Jones et Gallet [1960, 1962a, 1962b et 1965]. Les données ont été analysées en temps universel plutôt qu'en temps local et, comme coordonnée principale de latitude, on a eu recours non pas à la latitude géographique mais à une inclinaison magnétique modifiée [Jones et autres, 1969]. Ces changements ont beaucoup amélioré la représentation. Pour connaître les méthodes mathématiques employées ainsi que les détails d'interprétation et d'utilisation pratique, il convient de se reporter aux publications des auteurs. La brève description ci-dessous de la fonction numérique $\Omega(\lambda, \theta, T)$ renseigne sur la nature et la signification des coefficients des cartes numériques des caractéristiques de la couche F2 utilisées pour l'élaboration des diagrammes du présent Atlas.

La forme générale de la fonction numérique $\Omega(\lambda, \theta, T)$ est la série temporelle de Fourier:

$$\Omega(\lambda, \theta, T) = a_0(\lambda, \theta) + \sum_{j=1}^H [a_j(\lambda, \theta) \cos jT + b_j(\lambda, \theta) \sin jT] \quad (2.1)$$

dans laquelle:

λ : latitude géographique ($-90^\circ \leq \lambda \leq 90^\circ$)

θ : longitude géographique Est ($0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$)
(θ est en degrés Est à partir du méridien de Greenwich)

T : temps universel (UTC) exprimé en degrés d'angle ($-180^\circ \leq T \leq 180^\circ$)

H : nombre maximal d'harmoniques utilisés pour représenter la variation diurne.

Les coefficients de Fourier $a_j(\lambda, \theta)$ et $b_j(\lambda, \theta)$ varient avec les coordonnées géographiques et sont représentés par des séries de la forme:

$$a_j(\lambda, \theta) = \sum_{k=0}^K U_{2j,k} G_k(\lambda, \theta), j = 0, 1, 2, \dots, H \quad (2.2a)$$

$$b_j(\lambda, \theta) = \sum_{k=0}^K U_{2j-1,k} G_k(\lambda, \theta), j = 1, 2, \dots, H \quad (2.2b)$$

Le choix des fonctions $G_k(\lambda, \theta)$ est déterminé en fixant les entiers k ($k_0, k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_m; k_m = K$), i étant l'ordre en longitude. Une carte numérique peut donc se représenter plus explicitement par la fonction:

$$\Omega(\lambda, \theta, T) = \sum_{k=0}^K U_{0,k} G_k(\lambda, \theta) + \sum_{j=1}^H \left[\cos jT \sum_{k=0}^K U_{2j,k} G_k(\lambda, \theta) + \sin jT \sum_{k=0}^K U_{2j-1,k} G_k(\lambda, \theta) \right] \quad (2.3)$$

Dans les équations (2.2a), (2.2b) et (2.3), $U_{2j,k}$ et $U_{2j-1,k}$ peuvent être exprimés sous la forme $U_{s,k}$, où s correspond à $2j$ ou à $2j-1$.

Dans la méthode d'établissement de cartes numériques, on a utilisé la fonction:

$$I' = I / \sqrt{\cos \lambda} \quad (2.4)$$

I étant l'inclinaison magnétique et λ la latitude géographique [Rawer, 1963]. Pour éliminer les singularités de I' aux pôles géographiques, on a utilisé, dans les analyses de données, $X = \text{Arc tg } I'$ comme inclinaison magnétique modifiée pour l'établissement des cartes numériques des paramètres de la couche F2. X étant fonction à la fois de la latitude et de la longitude géographiques, l'expression formelle de $\Omega(\lambda, \theta, T)$ d'après l'équation (2.3) reste inchangée. Le Tableau I ci-dessous donne les fonctions géographiques $G_k(\lambda, \theta)$.

L'utilisation du paramètre I' comme coordonnée principale de latitude a amélioré la représentation mondiale des variations ionosphériques, surtout dans les régions équatoriales et polaires. Une fois les données analysées, les coordonnées de la représentation ont été transformées en latitude et longitude géographiques au moyen d'un programme d'ordinateur, en vue de préparer les diagrammes contenus dans le présent Atlas.

TABLEAU I — Fonctions géographiques $G_k(\lambda, \theta)$ (X est fonction de λ et de θ , m est l'ordre maximal en longitude)

$$q_0 = k_0; q_i (i = 1, m) = \frac{k_i - k_{i-1} - 2}{2}$$

k	Var. princ. en fonction de la latitude	k	Premier ordre en longitude	k	Deuxième ordre en longitude	...	k	m -ième ordre en longitude
0	1	$k_0 + 1$	$\cos \lambda \cos \theta$	$k_1 + 1$	$\cos^2 \lambda \cos 2 \theta$	...	$k_{m-1} + 1$	$\cos^m \lambda \cos m \theta$
1	$\sin X$	$k_0 + 2$	$\cos \lambda \sin \theta$	$k_1 + 2$	$\cos^2 \lambda \sin 2 \theta$	...	$k_{m-1} + 2$	$\cos^m \lambda \sin m \theta$
2	$\sin^2 X$	$k_0 + 3$	$\sin X \cos \lambda \cos \theta$	$k_1 + 3$	$\sin X \cos^2 \lambda \cos 2 \theta$	...	$k_{m-1} + 3$	$\sin X \cos^m \lambda \cos m \theta$
		$k_0 + 4$	$\sin X \cos \lambda \sin \theta$	$k_1 + 4$	$\sin X \cos^2 \lambda \sin 2 \theta$	...	$k_{m-1} + 4$	$\sin X \cos^m \lambda \sin m \theta$
.		.		.			.	
.		.		.			.	
.		.		.			.	
k_0	$\sin^{q_0} X$	$k_1 - 1$	$\sin^{q_1} X \cos \lambda \cos \theta$	$k_2 - 1$	$\sin^{q_2} X \cos^2 \lambda \cos 2 \theta$	...	$k_m - 1$	$\sin^{q_m} X \cos^m \lambda \cos m \theta$
		k_1	$\sin^{q_1} X \cos \lambda \sin \theta$	k_2	$\sin^{q_2} X \cos^2 \lambda \sin 2 \theta$	...	k_m	$\sin^{q_m} X \cos^m \lambda \sin m \theta$

2.3 Coefficients de foF2 et M(3000)F2

2.3.1 Coefficients d'Oslo

Le premier jeu de coefficients numériques définissant les variations diurnes et géographiques de foF2 (Oslo, 1966) [Jones et autres, 1969] est fondé sur une relation linéaire avec l'activité solaire. L'emploi de ces coefficients est recommandé pour la planification à long terme des fréquences. Les coefficients qui représentent les valeurs médianes mensuelles de foF2 et M(3000)F2 sont les valeurs des $U_{s,k}$ (voir les équations (2.2) et (2.3) ci-dessus) qui définissent la fonction $\Omega(\lambda, \theta, T)$ de la carte numérique de la caractéristique donnée pour le mois et pour le niveau d'activité solaire considérés. Ces coefficients sont disponibles pour chaque mois de l'année, pour les paramètres foF2 et M(3000)F2 et pour les deux niveaux d'activité solaire $R_{12} = 0$ et $R_{12} = 100$. R_{12} , moyenne glissante sur 12 mois du nombre mensuel de taches solaires R_f , est employé comme indice du niveau d'activité solaire. Les coefficients ont été obtenus, pour chaque caractéristique de la couche F2, pour chaque mois de l'année (pour les années 1954 à 1958), à partir des valeurs médianes mensuelles des données d'observation fournies par les sondages verticaux effectués par toutes les stations ionosphériques en fonctionnement. Les coefficients valables pour $R_{12} = 0$ et $R_{12} = 100$ pour un mois donné de l'année ont été déterminés par adaptation d'une ligne droite (selon la méthode des moindres carrés) aux valeurs de chaque coefficient pour le mois en question des cinq années. La valeur de chaque coefficient pour $R_{12} = 0$ et pour $R_{12} = 100$ a été calculée d'après la relation linéaire. Ces coefficients doivent être utilisés avec prudence pour les valeurs de $R_{12} > 150$ (voir le § 2.4.2). Ils peuvent être obtenus en s'adressant au Directeur du CCIR.

Les cartes numériques fondées sur les coefficients d'Oslo peuvent aussi être utilisées pour estimer les valeurs de foF2 au moyen de l'indice ionosphérique IG [Liu et autres, 1983]. La procédure consiste à redéfinir les valeurs de référence des cartes, qui seront $IG_{12} = 0$ et $IG_{12} = 100$ au lieu de $R_{12} = 0$ et $R_{12} = 100$. La valeur de foF2 pour une valeur donnée de IG_{12} est alors obtenue par interpolation ou extrapolation linéaire, en utilisant IG_{12} au lieu de R_{12} dans l'équation (2.5). La relation linéaire est applicable à tout le domaine de variation de l'activité solaire.

2.3.2 Coefficients de New Delhi

Un deuxième jeu de coefficients numériques définissant les variations diurnes, géographiques, saisonnières et undécennales (cycle d'activité solaire) de foF2 peut être obtenu en s'adressant au Directeur du CCIR. Ce jeu de coefficients (New Delhi, 1970) permet de centrer sur un jour quelconque de l'année les valeurs médianes mensuelles prévues de foF2 [Jones et Obitts, 1970]. Un polynôme du second degré représente les variations undécennales. L'utilisation de ces coefficients est recommandée pour les programmes de prévision à court terme.

2.4 Diagrammes des F2(ZÉRO)MUF et F2(4000)MUF

2.4.1 Description

F2(ZÉRO)MUF est la fréquence maximale utilisable de référence pour la distance zéro, c'est-à-dire à incidence verticale. Elle correspond à la $f_x F_2$, fréquence critique du rayon extraordinaire à incidence verticale. Pour obtenir les prévisions de F2(ZÉRO)MUF, on a ajouté la moitié de la gyrofréquence à la valeur de la foF2 calculée par emploi des coefficients des cartes numériques pour le mois et la valeur de R_{12} correspondants. En faisant cette approximation, on commet une erreur qui n'est généralement pas importante par rapport aux autres incertitudes des cartes numériques et des diagrammes. Cette erreur ne risque de prendre quelque importance que lorsque la foF2 est voisine de la gyrofréquence ou lui est inférieure. On peut, si l'on veut, appliquer aux valeurs de la foF2 calculées d'après les coefficients des cartes numériques l'expression plus précise déduite de la théorie magnéto-ionique.

F2(4000)MUF est la fréquence maximale utilisable de référence dans le cas d'une propagation par un bond sur la couche F2, pour une distance de 4000 km. Pour obtenir les prévisions de F2(4000)MUF, on a multiplié par 1,1 le produit des valeurs prévues de foF2 et de M(3000)F2. Ce facteur 1,1 est la valeur moyenne du rapport de M(4000)F2 à M(3000)F2.

Les figures des pages 86 à 373 du Rapport 340-4 (Genève, 1983) représentent les courbes isofréquences de F2(ZÉRO)MUF et de F2(4000)MUF pour chaque heure paire (UTC), pour chaque mois de l'année et pour $R_{12} = 0$ et $R_{12} = 100$. Ces diagrammes ont été établis à partir des cartes numériques correspondantes.

2.4.2 Interpolation pour l'activité solaire et la distance

Pour la plupart des applications, il suffit d'admettre que les variations de foF2 et de M(3000)F2 en fonction de R_{12} sont linéaires. En fait, la relation entre M(3000)F2 et R_{12} est effectivement linéaire dans tout le domaine de variation de R_{12} .

Bien que le niveau de l'activité solaire pour lequel la relation entre foF2 et R_{12} cesse d'être linéaire soit fonction de l'emplacement géographique, de l'heure de la journée et de la saison, l'écart le plus sensible par rapport à la linéarité est constaté pour les valeurs de R_{12} supérieures à 150 environ. Si l'indice d'activité solaire est supérieur à 150, on peut réduire l'erreur en considérant comme égales à 150 les valeurs de R_{12} supérieures à cette valeur.

La relation linéaire entre foF2 et R_{12} permet d'interpoler entre $R_{12} = 0$ et $R_{12} = 100$ et d'extrapoler pour R_{12} supérieur à 100 au moyen de la formule:

$$foF2 = f_0 + 0,01 (f_{100} - f_0) R_{12} \quad (2.5)$$

f_0 étant la valeur de foF2 pour $R_{12} = 0$ et f_{100} sa valeur pour $R_{12} = 100$.

On a de même:

$$M(3000)F2 = m_0 + 0,01 (m_{100} - m_0) R_{12} \quad (2.6)$$

m_0 et m_{100} étant respectivement les valeurs de M(3000)F2 pour $R_{12} = 0$ et pour $R_{12} = 100$. On peut utiliser des relations analogues pour calculer les valeurs de F2(ZÉRO)MUF et de F2(4000)MUF pour des valeurs de R_{12} différentes de 0 et de 100.

Les Fig. 10 et 11 qui représentent respectivement une carte du monde et le tracé d'un grand cercle, à la même échelle que les diagrammes isofréquences, ont pour objet de faciliter la détermination des emplacements des trajets, des distances le long du grand cercle et des points de réflexion. Si l'on veut déterminer la valeur de la MUF de référence de la couche F2 pour des distances comprises entre 0 et 4000 km en se servant des diagrammes relatifs à cette couche, on doit interpoler entre F2(ZÉRO)MUF et F2(4000)MUF pour un emplacement donné. Le nomogramme (Fig. 12) peut être utilisé à cet effet. Pour des liaisons de longueur supérieure à 4000 km, on peut soit recourir à la méthode des deux points directeurs (voir la Partie 9) soit diviser le trajet en un certain nombre de bonds d'au maximum 4000 km. Avec cette dernière solution, deux combinaisons de bonds, ou davantage, peuvent être possibles.

La Partie 9 présente une méthode manuelle détaillée pour déterminer la MUF de référence, qui inclut la F2(D)MUF, pour les liaisons de longueur inférieure à 4000 km et pour les liaisons de longueur supérieure à 4000 km.

La Partie 11 présente une version informatique de cette méthode.

2.5 Evaluation de F2(D)MUF au moyen d'un ordinateur

On trouvera à la Fig. 12 un nomogramme qui donne F2(D)MUF en fonction de F2(ZÉRO)MUF et de F2(4000)MUF, ces deux paramètres étant obtenus à partir de cartes ou en fonction des caractéristiques ionosphériques foF2, M(3000)F2 et f_H . Pour les calculs effectués par ordinateur, on obtient une meilleure précision en utilisant la relation suivante établie par Lockwood [1983]:

$$F2(D)MUF = \left[1 + \left\{ \frac{C_D}{C_{3000}} \right\} \left\{ B - 1 \right\} \right] \cdot foF2 + \frac{f_H}{2} \left(1 - \frac{D}{4000} \right) \quad (2.7)$$

dans laquelle:

$$C_D = 0,72 - 0,628z - 0,451z^2 - 0,03z^3 + 0,194z^4 + 0,158z^5 + 0,037z^6 \quad (2.8)$$

$$z = 1 - 2D/D_{max} \quad (2.9)$$

$$D_{max} = 3940 + \left\{ 9900 + \frac{15\,375}{x^2} + \frac{106\,700}{x^5} \right\} \left\{ \frac{1}{B} - 0,258 \right\} \quad (2.10)$$

et:

$$B = M(3000) - 0,124 + \left(M(3000)^2 - 4 \right) \left(0,0215 + 0,005 \sin \left\{ \frac{7,854}{x} - 1,9635 \right\} \right) \quad (2.11)$$

où:

D et D_{max} sont exprimés en kilomètres,

C_{3000} : valeur de C_D pour $D = 3000$ km, et

$x = 2$, ou foF2/foE si ce rapport est supérieur à 2.

2.6 Modèle du champ magnétique

On utilise un modèle du champ magnétique terrestre pour l'époque 1960, fondé sur une analyse harmonique sphérique d'ordre six [Jensen et Cain, 1962] pour déterminer l'inclinaison magnétique modifiée et la gyrofréquence dont on a besoin pour l'évaluation des cartes numériques. On doit utiliser l'époque 1960 plutôt qu'une autre car c'est l'époque considérée pour l'établissement des coefficients numériques.

L'induction magnétique F_x , F_y et F_z , en gauss, respectivement dans les directions géographiques nord et est et dans la direction verticale descendante, est donnée par les expressions:

$$F_x = \sum_{n=1}^6 \sum_{m=0}^n x_n^m \left[g_n^m \cos m\theta + h_n^m \sin m\theta \right] R^{n+2} \quad (2.12a)$$

$$F_y = \sum_{n=1}^6 \sum_{m=0}^n y_n^m \left[g_n^m \sin m\theta - h_n^m \cos m\theta \right] R^{n+2} \quad (2.12b)$$

$$F_z = \sum_{n=1}^6 \sum_{m=0}^n z_n^m \left[g_n^m \cos m\theta + h_n^m \sin m\theta \right] R^{n+2} \quad (2.12c)$$

où:

$$x_n^m = \frac{d}{d\varphi} \left(P_{n,m}(\cos \varphi) \right) \quad (2.13a)$$

$$y_n^m = m \cdot \frac{P_{n,m}(\cos \varphi)}{\sin \varphi} \quad (2.13b)$$

$$z_n^m = -(n+1)P_{n,m}(\cos \varphi) \quad (2.13c)$$

avec:

φ : colatitude nord ($= 90^\circ - \lambda$), où λ désigne la latitude géographique en degrés (nord positif, $-90^\circ \leq \lambda \leq 90^\circ$)

$P_{n,m}(\cos \varphi)$: fonction de Legendre associée, définie comme suit:

$$P_{n,m}(\cos \varphi) = \sin^m \varphi \left[\cos^{n-m} \varphi - \frac{(n-m)(n-m-1)}{2(2n-1)} \cos^{n-m-2} \varphi + \frac{(n-m)(n-m-1)(n-m-2)(n-m-3)}{(2)(4)(2n-1)(2n-3)} \cos^{n-m-4} \varphi + \dots \right] \quad (2.14)$$

g_n^m et h_n^m : coefficients numériques se rapportant au modèle du champ en gauss.

R : facteur de proportionnalité fonction de la hauteur, donné par:

$$R = \frac{6371,2}{6371,2 + h_r} \quad (2.15)$$

où:

h_r : hauteur à laquelle le champ est évalué (prise égale à 300 km).

Le champ magnétique total, F , a pour expression:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (2.16)$$

L'inclinaison magnétique, I et la gyrofréquence, f_H en MHz, ont pour expression:

$$I = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{F_z}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}} \right) \quad (2.17)$$

et:

$$f_H = 2,8F \quad (2.18)$$

L'inclinaison magnétique modifiée, I' , s'exprime en fonction de l'inclinaison magnétique comme indiqué par l'équation (2.4).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- DAVIES, K. [1965] Ionospheric radio propagation. National Bureau of Standards Monograph 80, US Government Printing Office, Washington, DC 20402.
- JENSEN, D. C. et CAIN, J. C. [1962] Interim magnetic field. *J. Geophys. Res.*, **9**, 3568-3569.
- JONES, W. B. et GALLET, R. M. [1960] Etablissement des cartes de l'ionosphère au moyen de méthodes numériques. *J. des Télécomm.*, Vol. 27, **12**, 280-282.
- JONES, W. B. et GALLET, R. M. [1962a] La représentation par des méthodes numériques des variations journalières et géographiques des données ionosphériques. *J. des Télécomm.*, Vol. 29, **5**, 129-147. Publié également dans *J. Res. NBS-D*, Vol. 66D (Radio Propagation), **4**, 419-438.
- JONES, W. B. et GALLET, R. M. [1962b] Methods for applying numerical maps of ionospheric characteristics. *J. Res. NBS-D*, Vol. 66D (Radio Propagation), **6**, 649-662.
- JONES, W. B. et GALLET, R. M. [1965] La représentation par des méthodes numériques des variations journalières et géographiques des données ionosphériques, II, Elimination des instabilités. *J. des Télécomm.*, Vol. 32, **1**, 18-28.
- JONES, W. B., GRAHAM, R. P. et LEFTIN, M. [1969] Advances in ionospheric mapping by numerical methods. ESSA Tech. Report ERL 107-ITS 75, US Government Printing Office, Washington, DC 20402.
- JONES, W. B. et OBITTS, D. L. [1970] Global representation of annual and solar cycle variation of foF2 monthly median 1954-1958. Telecommunications Research Report, OT/ITS/RR3, US Government Printing Office, Washington, DC 20402.
- LIU, R. Y., SMITH, P. A. et KING, J. W. [1983] Un nouvel indice solaire dont l'utilisation améliore les prévisions de foF2 fondées sur l'Atlas du CCIR. *J. des Télécomm.*, Vol. 50, **8**, 408-414.

- LOCKWOOD, M. [1983] A simple M-factor algorithm for improved estimation of the height of the basic maximum usable frequency of radio waves reflected from the ionospheric F region. *Proc. IEE*, Vol. 130F, 296-302.
- PIGGOTT, W. R. et RAWER, K. [1972] *URSI Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction* (2^e édition). World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics. Report UAG-23, NOAA, Boulder, CO 80303, Etats-Unis d'Amérique. Une traduction en espagnol existe à LIARA (Argentine) et une traduction en français au CNET (France).
- PIGGOTT, W. R. et RAWER, K. [1978] *URSI Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction* (2^e édition). Révision des chapitres 1 à 4, World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics. Report UAG-23A, NOAA, Boulder, CO 80303, Etats-Unis d'Amérique.
- RAWER, K. [1963] *Meteorological and Astronomical Influences on Radio-Wave Propagation*, 221-250. Pergamon Press, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

PARTIE 3

PRÉVISION DE foE ET DE LA MUF DE RÉFÉRENCE DE LA COUCHE E

3.1 Introduction

Il existe deux méthodes pour déterminer la MUF de référence de la couche E normale. La première méthode, qui se présente sous la forme d'une série de formules empiriques, se prête bien à une utilisation informatique. La seconde est une simple approximation qui convient à une utilisation manuelle.

3.2 Prévision empirique de foE et de la MUF de référence de la couche E

3.2.1 Prévision de foE

On trouvera ci-après une méthode de prévision de la médiane mensuelle de foE [Muggleton, 1975], fondée sur toutes les données publiées pour les années 1944-1973, pour 55 stations ionosphériques.

L'expression de foE en MHz est:

$$(foE)^4 = A B C D \quad (3.1)$$

où A est un facteur d'activité solaire:

$$A = 1 + 0,0094 (\Phi - 66) \quad (3.2)$$

Φ : moyenne mensuelle du flux de bruit radioélectrique solaire sur 10,7 cm, exprimé en unités $10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$. Pour les besoins des prévisions, on peut utiliser une approximation de Φ fondée sur une estimation de Φ_{12} , valeur moyenne glissante de Φ sur douze mois.

B est un facteur de variation saisonnière, donné par:

$$B = \cos^m N \quad (3.3)$$

où:

N est égal à $\lambda - \delta$ lorsque $|\lambda - \delta| < 80^\circ$, et à 80° lorsque $|\lambda - \delta| \geq 80^\circ$;

λ : latitude géographique (positive dans l'hémisphère Nord);

δ : déclinaison du Soleil (déclinaison nord positive).

L'exposant m est une fonction de la latitude géographique, λ :

$$m = -1,93 + 1,92 \cos \lambda \quad \text{pour } |\lambda| < 32^\circ \quad (3.4a)$$

ou:

$$m = 0,11 - 0,49 \cos \lambda \quad \text{pour } |\lambda| \geq 32^\circ \quad (3.4b)$$

C est le facteur principal de latitude:

$$C = X + Y \cos \lambda \quad (3.5a)$$

où:

$$X = 23, Y = 116 \quad \text{pour } |\lambda| < 32^\circ \quad (3.5b)$$

ou:

$$X = 92, Y = 35 \quad \text{pour } |\lambda| \geq 32^\circ \quad (3.5c)$$

D est un facteur qui tient compte de l'heure du jour:

1^{er} cas: $\chi \leq 73^\circ$

$$D = \cos^p \chi \quad (3.6a)$$

où χ est la distance zénithale du Soleil en degrés. Pour $|\lambda| \leq 12^\circ$, on a $p = 1,31$; pour $|\lambda| > 12^\circ$, $p = 1,20$.

2^e cas: $73^\circ < \chi < 90^\circ$

$$D = \cos^p (\chi - \delta\chi) \quad (3.6b)$$

où:

$$\delta\chi = 6,27 \times 10^{-13} (\chi - 50)^8 \quad \text{degrés} \quad (3.6c)$$

p étant défini comme dans le 1^{er} cas.

3^e cas: $\chi \geq 90^\circ$

Lorsque χ est égal ou supérieur à 90° , on prend pour valeur de D , pour les heures de nuit, la plus grande des valeurs données par les expressions suivantes:

$$D = (0,072)^p \exp(-1,4 h) \quad (3.6d)$$

ou:

$$D = (0,072)^p \exp(25,2 - 0,28 \chi) \quad (3.6e)$$

h étant le nombre d'heures écoulées depuis le coucher du Soleil ($\chi = 90^\circ$). Dans les conditions d'hiver polaire, où le Soleil ne se lève pas, il y a lieu d'utiliser la formule (3.6e). La valeur de p est la même que dans le premier cas.

La valeur minimale de foE, d'après Wakai [1971], est donnée par:

$$(\text{foE})_{\text{minimum}}^4 = 0,004 (1 + 0,021 \Phi)^2 \quad (3.7)$$

où l'on prend, comme approximation de Φ , l'estimation de Φ_{12} , valeur moyenne glissante de Φ sur douze mois.

De nuit, si la valeur de foE calculée selon les formules (3.1) à (3.6e) est inférieure à celle que donne la formule (3.7), c'est cette dernière qu'il faut prendre.

Des tests de précision de cette méthode ont fait apparaître un écart type moyen de 0,11 MHz, pour une base de données correspondant à plus de 80 000 comparaisons horaires pour les 55 stations considérées.

3.2.2 Prédiction de la MUF de référence de la couche E

La propagation ionosphérique par réflexion simple ou multiple sur la couche E est importante pour des distances inférieures ou égales à 2300 km. A ces distances, la MUF de référence d'un mode de propagation donné peut être considérée comme le produit de la valeur de foE au point milieu du trajet et du facteur de distance M correspondant au trajet simple équivalent.

La Fig. 1 donne le facteur M déduit de calculs de tracé de rayons pour un modèle parabolique de couche E ayant pour paramètres $h_m E = 110$ km et $y_m E = 20$ km, les effets du champ magnétique terrestre étant négligés. La courbe de la Fig. 1 est représentée approximativement par la formule:

$$\text{Facteur } M = 3,94 + 2,80x - 1,70x^2 - 0,60x^3 + 0,96x^4 \quad (3.8)$$

où:

$$x = \frac{d - 1150}{1150}$$

d étant la distance de transmission en kilomètres.

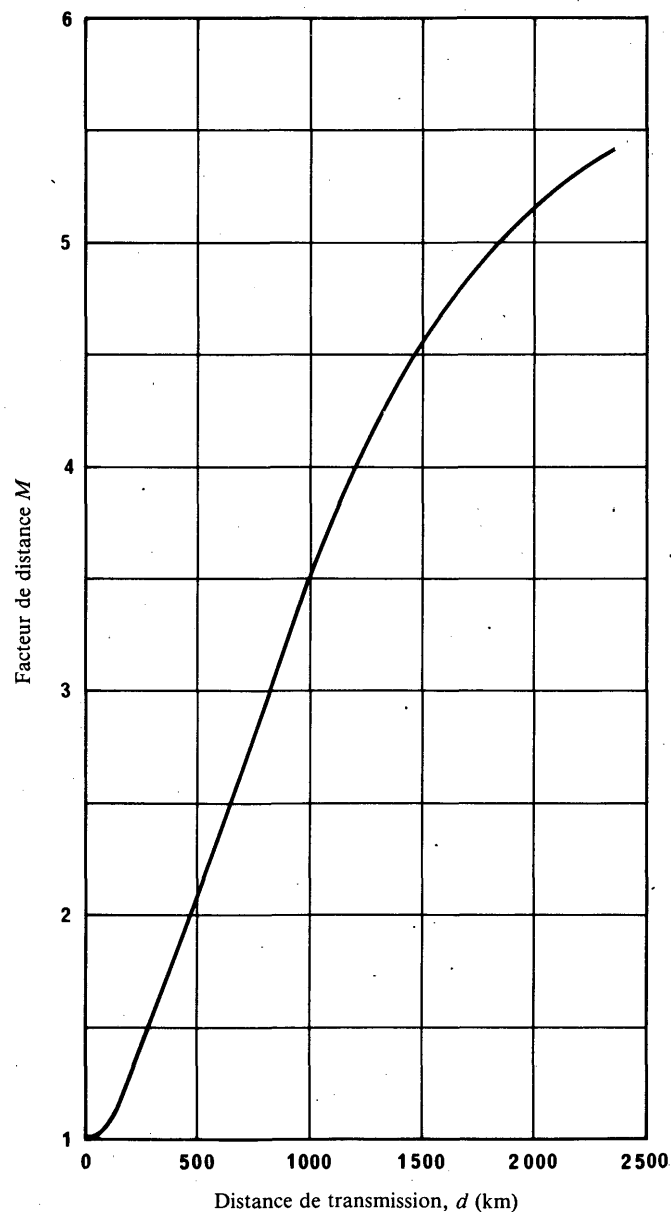


FIGURE 1 — Courbe du facteur de distance M pour la couche E

3.3 Prévision manuelle de foE et de la MUF de référence de la couche E

La méthode approximative donnée ici, qui convient à une utilisation manuelle, s'est révélée assez satisfaisante pour les heures de jour. Bien que la méthode tienne compte de la détermination de la MUF de référence de la couche E pendant les 24 heures de la journée, l'ionisation de la couche E normale durant la nuit est très faible et ne joue donc pas un rôle important dans la propagation des ondes décimétriques.

Une relation empirique donnée par Davies [1965] a été utilisée pour déterminer foE pour $\chi < 80^\circ$. Pour $80^\circ \leq \chi < 116^\circ$, les valeurs moyennes de foE ont été obtenues par la méthode décrite au § 3.2.1. Pour $\chi \geq 116^\circ$, la valeur limite de nuit est conforme aux résultats donnés par Wakai [1971].

Les pages 377 à 388 du Rapport 340-4 (Genève, 1983) contiennent des diagrammes de la distance zénithale du Soleil pour chaque mois, tracés à la même échelle que les diagrammes relatifs à la couche F2. Les courbes sont cependant dessinées en fonction de la latitude et de l'heure locale. Il faut donc prendre soin de convertir l'heure locale en temps universel lorsqu'on veut comparer la MUF de référence de la couche E normale à celle de la MUF de référence de la couche F2.

La valeur de la distance zénithale est lue sur le diagramme de la distance zénithale du Soleil pour la latitude et pour l'heure voulues. La valeur de foE sera déterminée par le nomogramme (Fig. 14) et la MUF de référence de la couche E normale peut être déterminée à partir du nomogramme (Fig. 15). La MUF de référence de la couche F1 qui figure sur le nomogramme a été calculée en appliquant la courbe du facteur M de la Fig. 1 jusqu'à des distances de 3400 km. On trouvera dans la Partie 4 une méthode plus précise pour déterminer la MUF de référence de la couche F1.

La Partie 9 présente une méthode manuelle détaillée qui permet de déterminer la MUF de référence du trajet qui tient compte de la MUF de référence des couches E ou F1 pour des distances allant jusqu'à 3400 km, ainsi que la MUF de référence de la couche F2 pour toutes les distances.

La Partie 11 présente une version informatique de cette méthode.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- DAVIES, K. [1965] Ionospheric radio propagation. National Bureau of Standards Monograph 80, US Government Printing Office, Washington, DC 20402.
- MUGGLETON, L. M. [1975] Une méthode pour la prévision de foE à un instant et en un lieu quelconques. *J. des Télécomm.*, Vol. 42, 413-418.
- WAKAI, N. [1971] Study on the night-time E region and its effect on the radio wave propagation. *J. Radio Res. Labs.* (Japon), Vol. 18, 245-348.

PARTIE 4

PRÉVISION DE foF1 ET DE LA MUF DE RÉFÉRENCE DE LA COUCHE F1

4.1 Introduction

On trouvera ci-dessous une méthode de prévision de la médiane mensuelle de la MUF de référence de la couche F1 dans laquelle cette couche est considérée en soi et non dans le cadre d'une extension d'un système de prévision relatif à la couche E. Les expressions obtenues pour prévoir la fréquence critique de la couche F1 étaient fondées sur les données enregistrées de 1954 à 1966 en 39 stations ionosphériques situées dans les deux hémisphères [DuCharme et autres, 1973]. Les agents en service dans les stations ionosphériques de bien des pays utilisent des méthodes normalisées pour réduire les observations ionosphériques [Piggott et Rawer, 1972 et 1978]. La MUF de référence de la couche F1 pour un circuit oblique se déduit de la connaissance de la fréquence de pénétration au point milieu du trajet et d'un facteur M pour la couche F1, pour la distance appropriée le long de l'arc de grand cercle [Petrie et Stevens, 1965].

4.2 Détermination de la fréquence critique de la couche F1 (foF1)

Divers chercheurs [Allen, 1948; Scott, 1952; Ratcliffe et Weekes, 1960] ont signalé que foF1 varie avec la distance zénithale du Soleil et que l'on peut généralement représenter son comportement de façon tout à fait précise par la formule:

$$\text{foF1} = f_s \cos^n \chi \quad (4.1)$$

où $\chi \leq \chi_m$ (valeur maximale de la distance zénithale du Soleil pour laquelle la couche F1 est observée en un lieu donné) et les paramètres f_s et n dépendent de l'activité solaire et de l'emplacement [Harnischmacher, 1950; Scott, 1952].

Il arrive cependant que les variations diurnes de f_oF_1 en des lieux voisins de l'équateur soient indépendantes de la distance zénithale du Soleil en période d'activité solaire élevée [Lange-Hesse, 1959], mais dépendent des variations des taux photochimiques.

Plusieurs chercheurs [Theissen, 1953; Davies, 1965] ont fourni des indications sur les variations de f_s et de n avec l'activité solaire. On a trouvé [DuCharme et autres, 1973] une relation à peu près linéaire entre les caractéristiques de la couche F1 et divers indices ionosphériques et solaires. D'après Minnis [1955], la représentation de ces paramètres par l'indice ionosphérique I_{F_2} est un peu meilleure que par la moyenne glissante sur 12 mois du nombre des taches solaires R_{12} . Il convient cependant d'utiliser l'indice R_{12} pour les prévisions relatives à la couche F1, car cet indice est recommandé pour toutes les prévisions ionosphériques faites plus de 12 mois à l'avance (Recommandation 371).

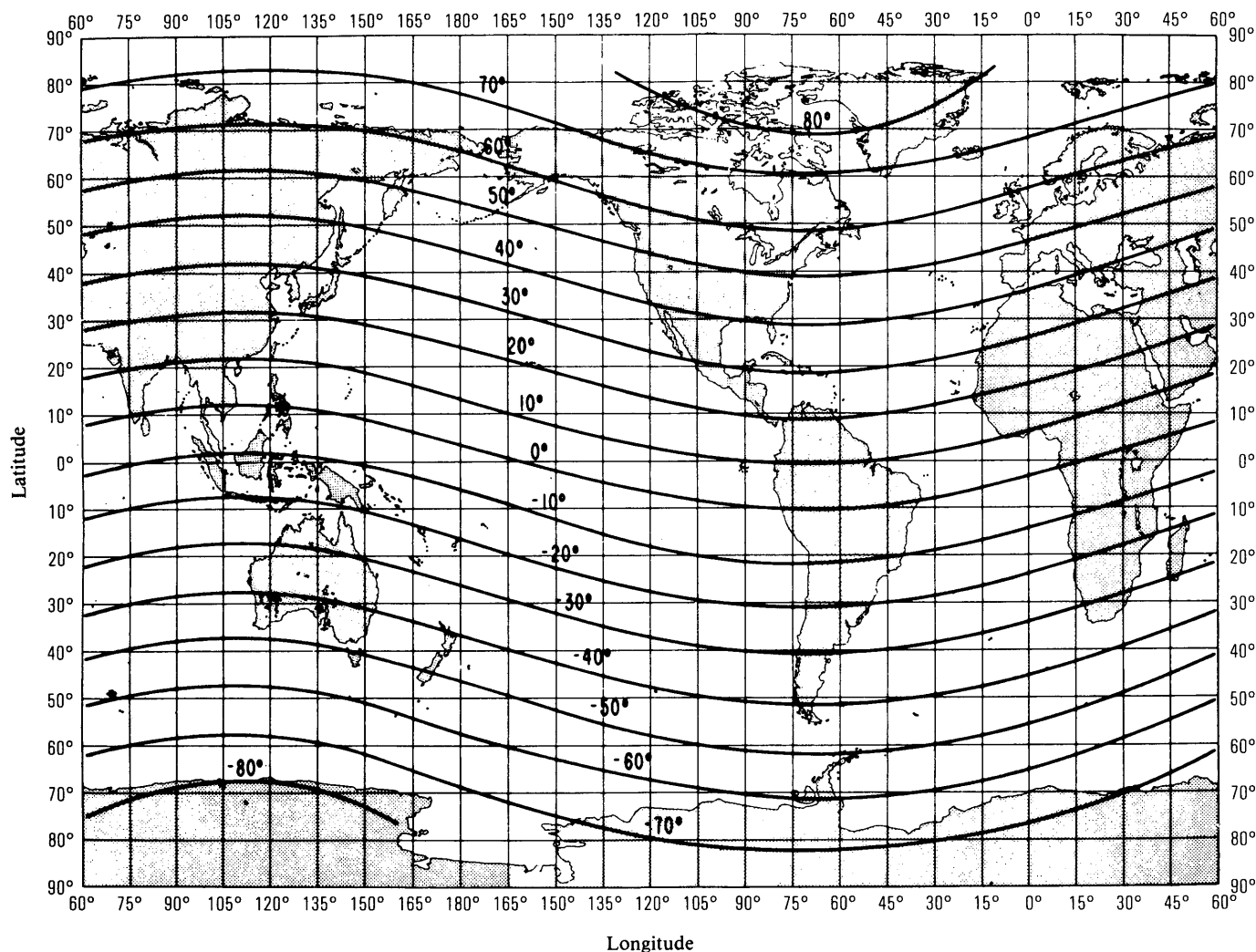


FIGURE 2 – Latitudes géomagnétiques

Cette carte a été établie à partir du champ géomagnétique international de référence pour l'année 1965. (Pôle géomagnétique Nord: 78,8° N, 70,0° O et pôle géomagnétique Sud: 78,8° S, 110,0° E.)

Extrait de:

CAMPBELL, W.H. [juin 1972] Introduction to solar terrestrial activity for geomagnetic studies, Part II: The Earth's main field. NOAA Technical Report ERL 244-SEL 23, US Government Printing Office, Washington, DC 20402.

Kervin [1967] a signalé des différences dans le comportement de foF1 entre l'Amérique du Nord et l'Europe, mais ces différences sont considérablement réduites si l'on représente les données en fonction de la latitude géomagnétique. L'emploi de cette latitude comme coordonnée a conduit à une meilleure représentation des variations de la couche F1 que celui des coordonnées géographiques, de l'inclinaison magnétique, de l'inclinaison magnétique modifiée ou de latitude magnétique invariante [DuCharme et autres, 1973].

Une analyse des valeurs de foF1 montre que cette caractéristique peut, pour toute valeur de R_{12} , se déduire des expressions suivantes:

$$\text{foF1} = f_s \cos^n \chi \quad (4.2)$$

avec

$$\begin{aligned} f_s &= f_{s_0} + 0,01 (f_{s_{100}} - f_{s_0}) R_{12} \\ f_{s_0} &= 4,35 + 0,0058 \lambda - 0,000120 \lambda^2 \\ f_{s_{100}} &= 5,35 + 0,0110 \lambda - 0,000230 \lambda^2 \\ n &= 0,093 + 0,00461 \lambda - 0,0000540 \lambda^2 + 0,00031 R_{12} \end{aligned}$$

λ étant la latitude géomagnétique en degrés.

La distance zénithale maximale du Soleil pour laquelle la couche F1 est présente est donnée par les expressions ci-après:

$$\chi_m = \chi_0 + 0,01 (\chi_{100} - \chi_0) R_{12} \text{ (degrés)} \quad (4.3)$$

avec

$$\begin{aligned} \chi_0 &= 50,0 + 0,348 \lambda \\ \chi_{100} &= 38,7 + 0,509 \lambda \end{aligned}$$

Une carte du monde (Fig. 10), un tracé de grands cercles (Fig. 11) et une carte des latitudes géomagnétiques (Fig. 2) faciliteront la détermination des trajets, de la distance le long du grand cercle et des points de réflexion. La connaissance de la latitude géomagnétique au point de réflexion permet de déterminer f_s , n et χ_m pour n'importe quelle valeur de R_{12} en se servant des renseignements contenus dans les Fig. 3 à 5. Le nomogramme de la Fig. 6 permet de déterminer la valeur de foF1 d'après celles de f_s , n et χ . Aux pages 377 à 388 du Rapport 340-4 (Genève, 1983) figurent des diagrammes de la distance zénithale du Soleil pour chaque mois. Le calcul de foF1 n'est valable que sous réserve de la condition $\chi \leq \chi_m$.

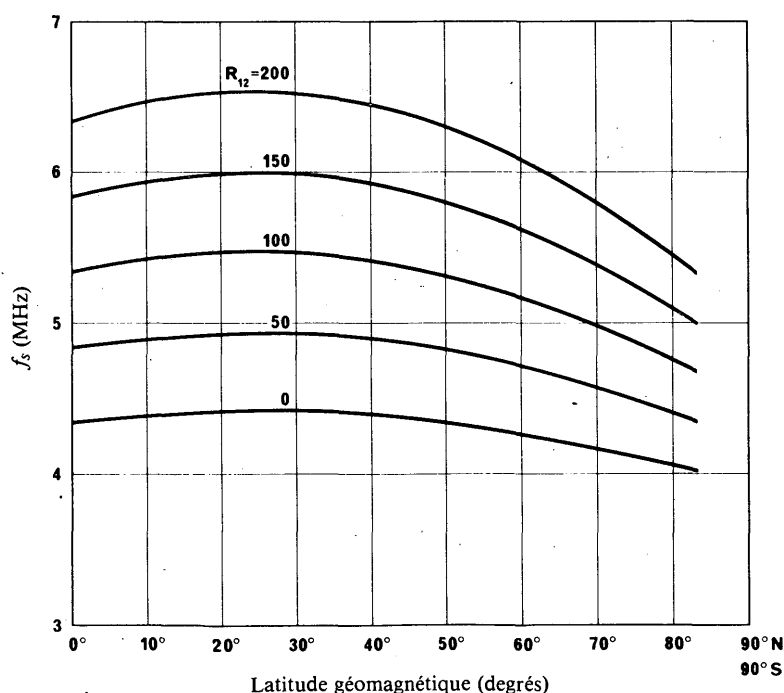


FIGURE 3 – Variation de f_s en fonction de la latitude géomagnétique et de R_{12}

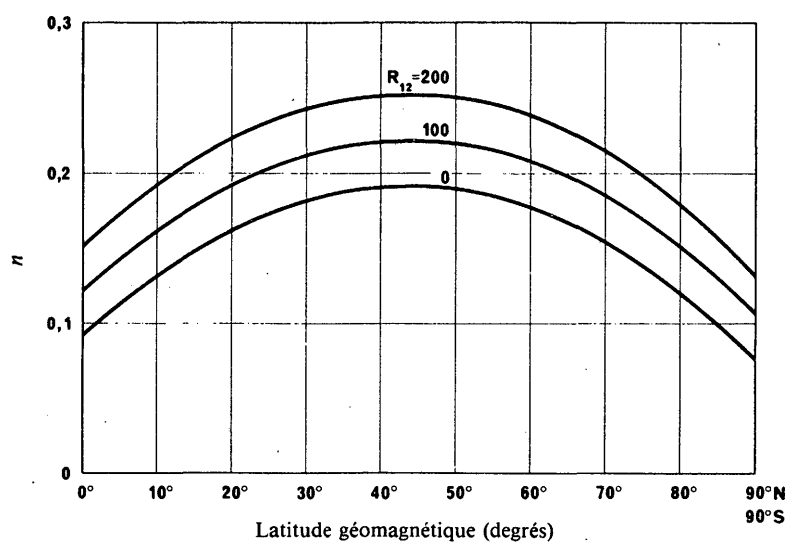


FIGURE 4 – Variation de n en fonction de la latitude géomagnétique et de R_{12}

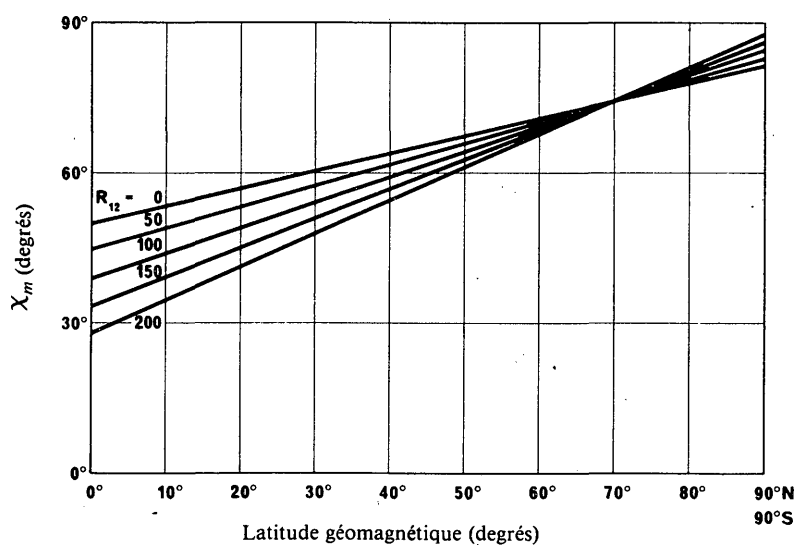


FIGURE 5 – Variation de X_m en fonction de la latitude géomagnétique et de R_{12}

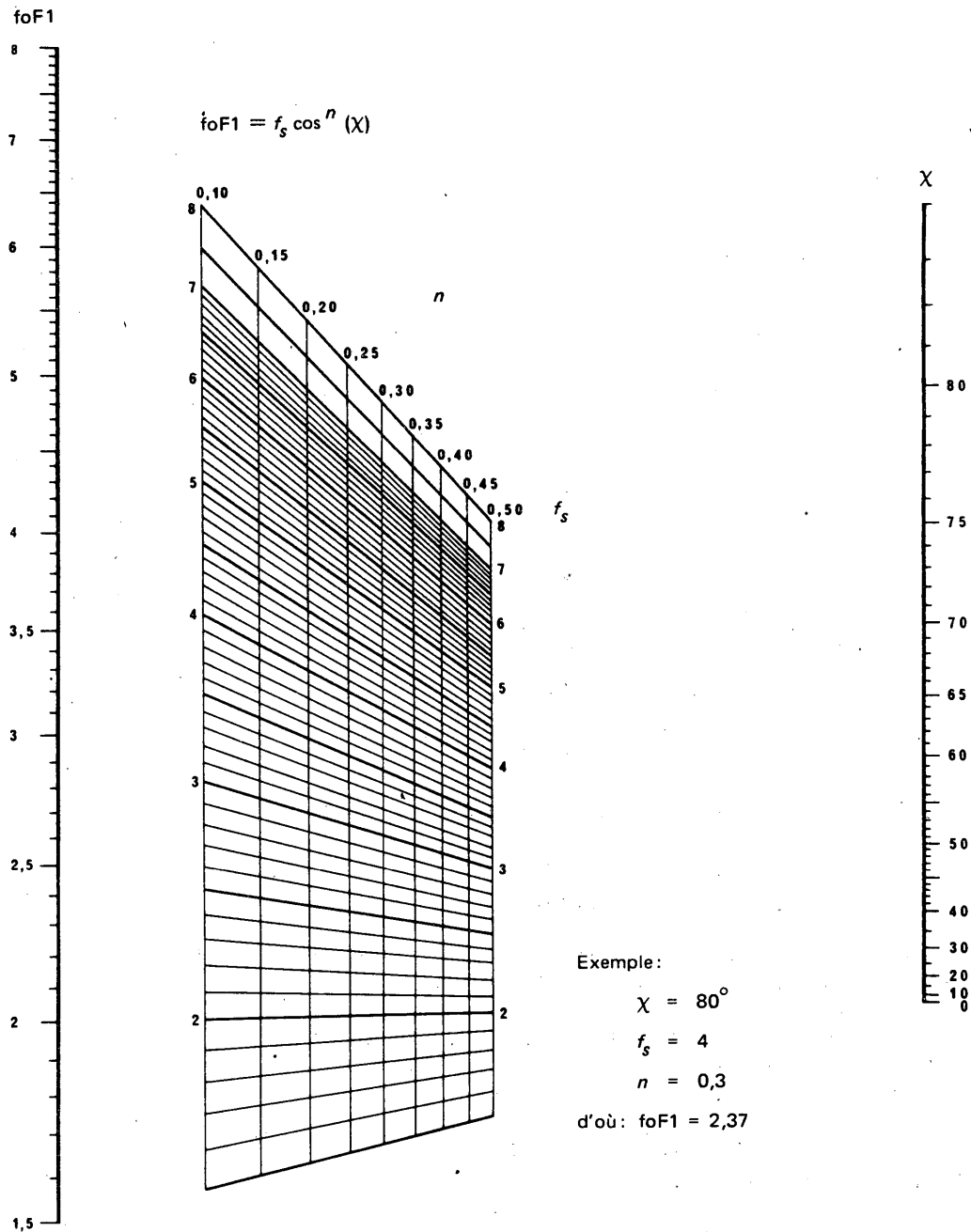


FIGURE 6 – Nomogramme pour la détermination de foF1

4.3 Détermination de la MUF de référence de la couche F1

La propagation ionosphérique par la couche F1 présente de l'importance pour les distances de 2000 à 3400 km, aux latitudes élevées et moyennes pendant les mois d'été. Pour ces distances de transmission, Petrie et Stevens [1965] ont déterminé des facteurs M de la couche F1 qui permettent de calculer la MUF de référence. Ils ont obtenu ces facteurs au moyen de calculs, par tracé de rayons, sur des profils de la densité électronique en fonction de la hauteur déterminés à partir d'ionogrammes représentatifs pour midi, enregistrés sous des latitudes moyennes et élevées. On admet que ces facteurs sont applicables pour toutes les valeurs de la distance zénithale du Soleil. Le facteur M peut se déduire des expressions numériques suivantes, R_{12} étant compris entre 0 et 150:

$$\text{Facteur } M = J_0 - 0,01 (J_0 - J_{100}) R_{12} \quad (4.4)$$

avec

$$J_0 = 0,16 + 2,64 \times 10^{-3} D - 0,40 \times 10^{-6} D^2$$

$$J_{100} = -0,52 + 2,69 \times 10^{-3} D - 0,39 \times 10^{-6} D^2$$

D étant la distance le long du grand cercle, en kilomètres (entre 2000 et 3400 km).

Pour les calculs effectués à la main, on peut relever le facteur M sur la Fig. 7. La MUF de référence de la couche F1 est égale au produit de la foF1 par le facteur M .

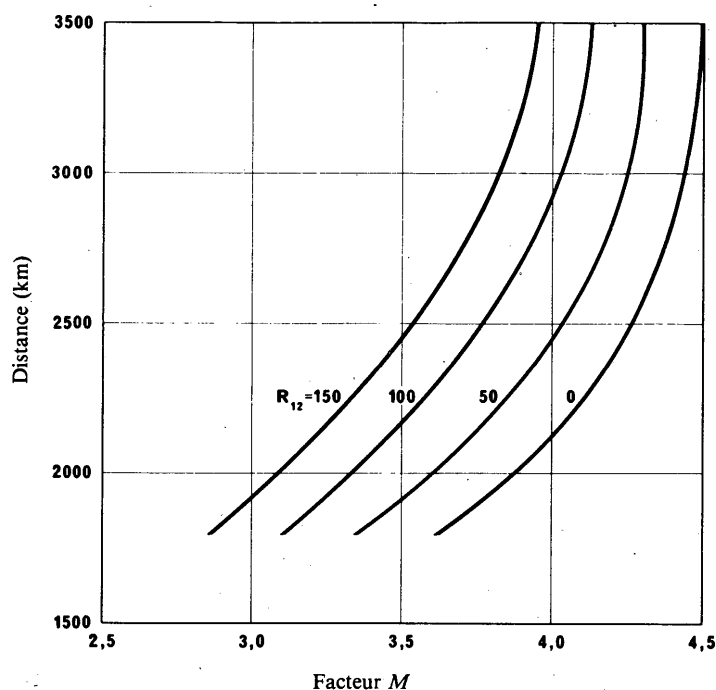


FIGURE 7 – Courbes du facteur de distance M pour la couche F1

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALLEN, C. W. [1948] Critical frequencies, sunspots and sun's ultra violet radiation. *Terr. Magn. Atmos. Elect.*, **53**, 433-448.
- DAVIES, K. [1965] *Ionospheric radio propagation*. National Bureau of Standards Monograph 80, US Government Printing Office, Washington, DC 20402.
- DUCHARME, E. D., PETRIE, L. E. et EYFRIG, R. [1973] A method for predicting the F1 layer critical frequency based on the Zurich smoothed sunspot number. *Radio Sci.*, Vol. 8, 837-839.
- HARNISCHMACHER, E. [1950] L'influence solaire sur la couche E normale de l'ionosphère. *C. R. Acad. Sci. (Paris)*, **230**, 1301.
- KERVIN, C. [1967] Non-Chapman-like behaviour of the F1 layer. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 27, 1299.
- LANGE-HESSE, G. [1959] Average diurnal variation of the critical frequencies of the F1 layer and their dependence on the geographic latitude and season. *Z. für Geophysik*, **25**, 199.
- MINNIS, C. M. [1955] A new index of solar activity based on ionospheric measurements. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **7**, 301.
- PETRIE, L. E. et STEVENS, E. E. [1965] An F1 layer MUF prediction system for northern latitudes. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-13, 542.
- PIGGOTT, W. R. et RAWER, K. [1972] *URSI Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction* (2^e édition). World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics. Report UAG-23. NOAA, Boulder, CO 80303, Etats-Unis d'Amérique. Une traduction en espagnol existe à LIARA (Argentine) et une traduction en français au CNET (France).
- PIGGOTT, W. R. et RAWER, K. [1978] *URSI Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction* (2^e édition). Révision des chapitres 1 à 4, World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics. Report UAG-23A. NOAA, Boulder, CO 80303, Etats-Unis d'Amérique.
- RATCLIFFE, J. A. et WEEKES, K. [1960] *Physics of the Upper Atmosphere*. Edité par J. A. Ratcliffe, chapitre 9, Academic Press, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.
- SCOTT, J. C. W. [1952] The solar control of the E and F1 layers at high latitudes. *J. Geophys. Res.*, Vol. 57, 369.
- THEISSEN, E. [1953] Quelques résultats relatifs à la fréquence critique et au facteur de transmission de la couche ionosphérique F1. *C. R. Acad. Sci. (Paris)*, **A237**, 1104.

BIBLIOGRAPHIE

- PETRIE, L. E. [1968] Developments of HF predictions for the Arctic. Publié dans *Ionospheric Radio Communications*, 263-271. Plenum Press, New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.

PARTIE 5

COEFFICIENTS NUMÉRIQUES POUR foEs ET fbEs

Le Directeur du CCIR dispose d'un jeu de coefficients numériques définissant les variations diurnes, géographiques et saisonnières des valeurs médianes et des déciles inférieur et supérieur de foEs pour une année d'activité solaire minimale et une année d'activité solaire maximale, ainsi que d'un jeu de coefficients numériques définissant les variations des valeurs médianes et des déciles inférieur et supérieur de fbEs (fréquence d'occultation de E sporadique) pour une année d'activité solaire minimale.

Des observations de E sporadique effectuées en 1965, 1967, 1969 et 1971 dans 15 stations de sondage à incidence verticale situées dans les régions tempérées de l'hémisphère Nord en Europe, en Asie et au Japon, ont été comparées avec les valeurs médianes et les déciles supérieurs prévus pour foEs [Gosnell et Leftin, 1976]. En général, les valeurs médianes et les déciles supérieurs prévus pour foEs sont trop élevés. Les erreurs de prévision moyennes pour la valeur médiane de foEs sont comprises dans un intervalle de $\pm 0,5$ MHz, mais elles sont sensiblement plus grandes pour les déciles supérieurs. L'écart type de l'erreur de prévision de la valeur médiane se trouve compris entre 0,3 et 0,75 MHz, et entre 0,6 et 1,8 MHz pour le décile supérieur de foEs. On trouve l'erreur de prévision la plus grande dans la représentation diurne. Pendant les heures du jour, l'erreur de prévision de la valeur médiane de foEs est comprise dans un intervalle de $\pm 5\%$, et de $\pm 10\%$ pour le décile supérieur de foEs. Pendant les heures de nuit, l'erreur de prévision de la valeur médiane de foEs est comprise dans l'intervalle $\pm (10 \text{ à } 35)\%$, et dans l'intervalle $\pm (15 \text{ à } 60)\%$ pour le décile supérieur.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

GOSNELL, P. C. et LEFTIN, M. [1976] Analysis of occurrence of sporadic-E and accuracy of predictions of sporadic-E critical frequencies for temperate-latitude northern-hemisphere stations. Office of Telecommunications, Report 76-89, US Department of Commerce, Boulder, CO 80303.

BIBLIOGRAPHIE

LEFTIN, M., OSTROW, S. M. et PRESTON, C. [1968] Numerical maps of foEs for solar cycle minimum and maximum. ESSA Tech. Report ERL 73-ITS 63, US Government Printing Office, Washington, DC 20402.

LEFTIN, M. et OSTROW, S. M. [1969] Numerical maps of fbEs for solar cycle minimum. ESSA Tech. Report ERL 124-ITS 87, US Government Printing Office, Washington, DC 20402.

PARTIE 6

COEFFICIENTS NUMÉRIQUES POUR LE POURCENTAGE
D'OCCURRENCE DE F-DIFFUS

On a déterminé le pourcentage d'occurrence de F-diffus, à partir des données ionosphériques recueillies par le réseau mondial de stations à incidence verticale, pour une année correspondant à un niveau élevé de l'activité solaire et pour une année correspondant à un niveau peu élevé de cette activité [Davis, 1972]. Ces valeurs ont été représentées numériquement selon la méthode de cartographie de Jones et autres [1969]. On peut se procurer ces coefficients numériques, établis pour tous les mois de l'année, en s'adressant au Directeur du CCIR.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

DAVIS, R. M. [1972] The occurrence of spread-F and its effect on HF propagation. Office of Telecommunications, TRER 28, US Government Printing Office, Washington, DC 20402.

JONES, W. B., GRAHAM, R. P. et LEFTIN, M. [1969] Advances in ionospheric mapping by numerical methods. ESSA Tech. Report ERL 107-ITS 75, US Government Printing Office, Washington, DC 20402.

PARTIE 7

COEFFICIENTS NUMÉRIQUES POUR h'F ET h'F,F2

On a établi pour des années d'activité solaire maximale et minimale, des cartes numériques de h'F qui est la hauteur virtuelle minimale observée de réflexion de signaux à incidence verticale en provenance de la région F (généralement, de nuit, la couche F2 et, de jour, la couche F1 de cette région). On a établi aussi, pour des années d'activité solaire maximale et minimale, des cartes numériques de h'F,F2 qui est la hauteur virtuelle minimale observée de réflexion de signaux à incidence verticale en provenance de la couche F2, tant de jour que de nuit [Leftin et autres, 1969]. On peut se procurer ces deux jeux de coefficients en s'adressant au Directeur du CCIR.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

LEFTIN, M., OSTROW, S. M. et PRESTON, C. [1969] Numerical maps of monthly median h'F,F2 for solar cycle minimum and maximum. ESSA Tech. Memo. IERTM-ITSA 69, US Dept. of Commerce, Boulder, CO 80303.

PARTIE 8

MODÈLE DE DISTRIBUTION VERTICALE DE LA DENSITÉ
ÉLECTRONIQUE DANS LES RÉGIONS E ET F

8.1 Introduction

On a établi un modèle simple de la distribution verticale de la densité électronique dans les régions E et F. Pour ce modèle, les paramètres sont déduits des équations empiriques qui les relient aux caractéristiques ionosphériques mesurées selon la méthode classique, à savoir foE, foF2, M(3000)F2 et h'F ou h'F2 en choisissant celle qui représente la hauteur de réflexion virtuelle minimale sur la couche F2. Comme on dispose de valeurs de prévision pour toutes ces caractéristiques, le modèle peut être mis en œuvre pour un emplacement quelconque et pour une heure quelconque. On considère que ce modèle présente un intérêt pratique aussi bien pour les prévisions de la propagation que pour des études sur la morphologie de l'ionosphère.

8.2 Description détaillée du modèle

Le modèle, élaboré par Bradley et Dudeney [1973], est représenté par la Fig. 8. Il se compose des éléments suivants:

- une couche E parabolique en dessous de la hauteur de sa densité électronique maximale hmE et ayant une demi-épaisseur ymE. On suppose que la valeur de hmE est constante (110 km) ainsi que celle de ymE (20 km);
- une couche F2 parabolique, caractérisée par une hauteur de densité électronique maximale hmF2 et une demi-épaisseur ymF2;
- une augmentation linéaire de la densité électronique en fonction de la hauteur, entre hmE et le point de la couche parabolique F2 où la fréquence du plasma f_p est égale à 1,7 foE.

Les paramètres hmF2 et ymF2 sont donnés par les équations empiriques suivantes [Bradley et Dudeney, 1973; Bilitza et autres, 1979]:

$$hmF2 = \frac{1490}{M(3000)F2 + \Delta M} - 176 \quad (8.1a)$$

avec

$$\Delta M = \frac{0,18}{x - 1,4} + \frac{0,096 (R_{12} - 25)}{150} \quad (8.1b)$$

où l'on prend pour x la plus grande des 2 valeurs: $\frac{foF2}{FoE}$ ou 1,7

et R_{12} = moyenne glissante sur 12 mois du nombre de taches solaires R_f .

$$y_{mF2} = h_{mF2} - h'_{F,F2} + \Delta h' \quad (8.2a)$$

où:

$$\Delta h' = \left(\frac{0,613}{x - 1,33} \right)^{0,86} \cdot (h_{mF2} - 104) \quad (8.2b)$$

y_{mF2} a une valeur minimale spécifiée de 35 km et une valeur maximale correspondant à $(h_{mF2} - h_{mE})$.

Pour le cas particulier où $x = 1,7$, on admet que la concentration électronique augmente d'une façon linéaire avec la hauteur entre h_{mE} et h_{mF2} ,

c'est-à-dire:

$$y_{mF2} = 0 \text{ pour } x = 1,7 \quad (8.3)$$

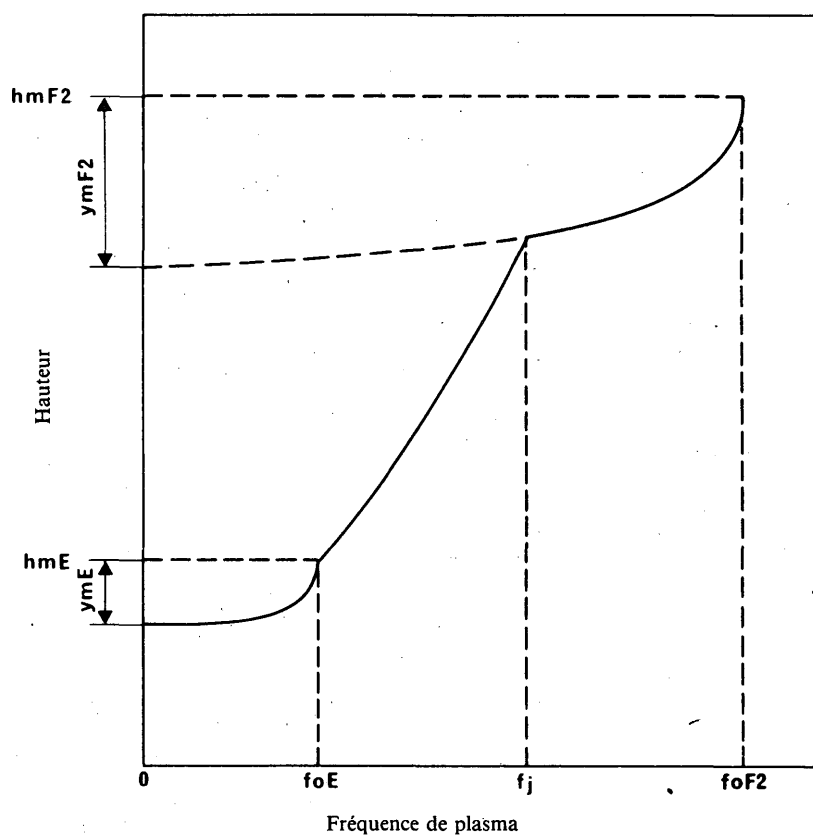


FIGURE 8 – Modèle Bradley-Dudeney

Ce modèle se compose des éléments suivants:

- une couche E parabolique;
- une augmentation linéaire de la concentration électronique en fonction de la hauteur dans la région F1;
- une couche F2 parabolique.

L'échelle des ordonnées est linéaire en hauteur et celle des abscisses est linéaire en fréquence.

8.3 Précision du modèle

Des comparaisons avec des analyses de la hauteur vraie, à partir d'ionogrammes enregistrés en différents emplacements, heures du jour, saisons et périodes d'activité solaire, confirment que les estimations du modèle, basées sur les valeurs mesurées des caractéristiques ionosphériques à incidence verticale, pour les hauteurs correspondant aux densités électroniques données, sont généralement correctes à 20-30 km près.

8.4 Cartes de hmF2

La Fig. 9 donne un exemple de carte mondiale de hmF2 déduite de l'équation (8.1) et basée sur les cartes numériques de prévision des caractéristiques ionosphériques. On peut établir de la même façon des cartes de ymF2, en appliquant les équations (8.1) et (8.2).

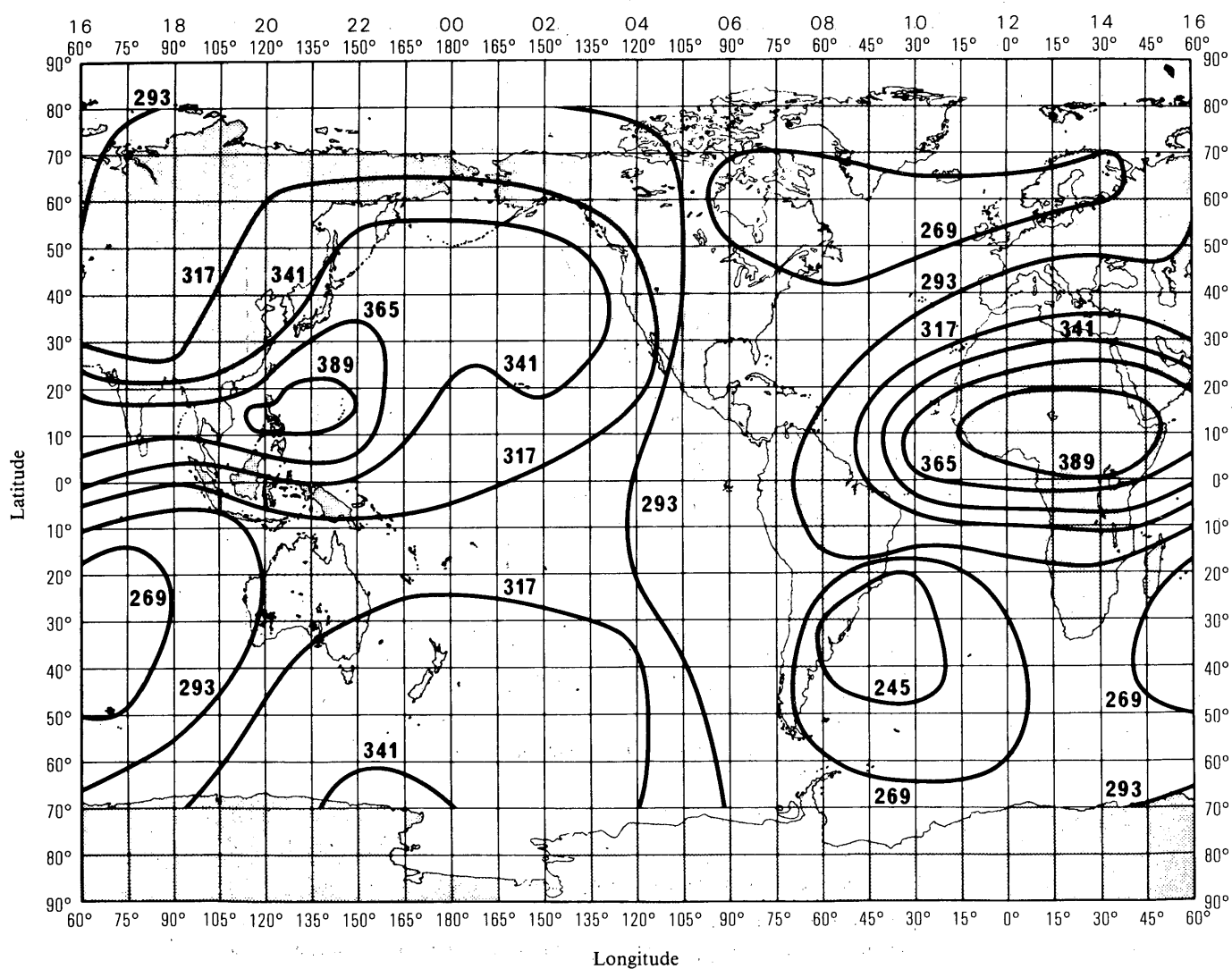


FIGURE 9 – Valeurs prévues de hmF2 pour 1200 h (UTC) en juin, avec $R_{12} = 100$
(Hauteurs exprimées en kilomètres)

8.5 Hauteurs de réflexion réelle et virtuelle sous incidence verticale dans le modèle

Dans ce modèle, il existe des expressions analytiques de la hauteur réelle de réflexion h , et de la hauteur virtuelle h' pour la propagation sous incidence verticale. Pour une fréquence f telle que:

$$f \leq f_oE \quad \text{avec} \quad \frac{f}{f_oE} = x_E$$

$$h = hmE - ymE \sqrt{1 - x_E^2} \quad (8.4)$$

$$h' = (hmE - ymE) + x_E \cdot ymE \cdot \arg \operatorname{th} x_E \quad (8.5)$$

$$f_oE < f \leq f_j \quad \text{avec} \quad \frac{f}{f_j} = x_j; x_E \geq 1$$

$$h = hmE + (h_j - hmE) \cdot \frac{x_j^2 \cdot (x_E^2 - 1)}{(x_E^2 - x_j^2)} \quad (8.6)$$

$$h' = (hmE - ymE) + x_E \cdot ymE \cdot \arg \operatorname{coth} x_E + 2(h_j - hmE) \cdot \frac{x_j^2 x_E \sqrt{x_E^2 - 1}}{(x_E^2 - x_j^2)} \quad (8.7)$$

$$f_j < f \leq f_oF2 \quad \text{avec} \quad \frac{f}{f_oF2} = x_{F2}; x_E > 1; x_j > 1$$

$$h = hmF2 - ymF2 \sqrt{1 - x_{F2}^2} \quad (8.8)$$

$$h' = (hmE - ymE) + x_E \cdot ymE \cdot \arg \operatorname{coth} x_E + 2(h_j - hmE) \cdot \frac{x_j \cdot x_E \left[x_j \sqrt{x_E^2 - 1} - x_E \sqrt{x_j^2 - 1} \right]}{(x_E^2 - x_j^2)} + \\ x_{F2} \cdot ymF2 \cdot \arg \operatorname{ch} \left(\frac{hmF2 - h_j}{ymF2 \sqrt{1 - x_{F2}^2}} \right) \quad (8.9)$$

h_j est la hauteur du point d'intersection de la partie linéaire et de la courbe F2 du modèle correspondant à une fréquence de plasma f_j . Cette valeur est donnée par l'expression:

$$h_j = hmF2 - ymF2 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_j}{f_oF2} \right)^2} \quad (8.10)$$

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BILITZA, D., SHEIKH, Noor M. et EYFRIG, R. [1979] Modèle mondial de la hauteur maximale de la couche F2 fondé sur les valeurs M3000 des cartes numériques du CCIR. *J. des Télécomm.*, Vol. 46, IX, 549.
- BRADLEY, P.A. et DUDENEY, J.R. [1973] A simple model of the vertical distribution of electron concentration in the ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 35, 2131-2146.

PARTIE 9

MÉTHODE MANUELLE D'ÉVALUATION DE LA MÉDIANE MENSUELLE DE LA MUF DE RÉFÉRENCE ET DE LA FRÉQUENCE OPTIMALE DE TRAVAIL POUR DES LIAISONS DE TOUTE LONGUEUR

9.1 Introduction

On trouvera dans la présente partie la description, étape par étape, d'une méthode manuelle qui permet d'utiliser les cartes mondiales de la MUF de référence de la couche F2 contenues dans la Partie 10 pour déterminer la médiane mensuelle de la MUF de référence, définie dans la Recommandation 373. Dans cette méthode, on admet que l'ionosphère et la Terre sont concentriques et que la propagation se fait suivant un grand cercle.

Pour les liaisons de longueur inférieure ou égale à 4000 km, on admet généralement que la MUF de référence est associée à un mode de propagation à un seul bond, dont le point de réflexion est situé au point milieu du trajet et est appelé «point directeur». Les trajets de plus de 4000 km impliquent normalement plusieurs réflexions sur l'ionosphère et il faut faire intervenir au moins deux points directeurs pour évaluer la MUF de référence. Ces points sont choisis le long du grand cercle, à 2000 km de chaque extrémité. Puisque l'on ne peut pas, avec une méthode manuelle, prendre en considération les effets des inclinaisons de l'ionosphère, de la diffusion ou du rayon de Pedersen, cette méthode des deux points directeurs donne une approximation utile des effets ionosphériques qui tendent à élever la MUF d'exploitation.

La couche F2 étant très variable, la distribution des MUF de référence autour de la médiane mensuelle peut être importante. Par conséquent, pour les besoins de l'exploitation, la fréquence optimale de travail (FOT), qui est approximativement égale à la valeur de la MUF de référence dépassée pendant 90% des jours d'un mois, est souvent considérée comme une fréquence limite supérieure pour les circuits de communication.

Les cartes mondiales de la F2(ZÉRO)MUF et de la F2(4000)MUF tracées à partir des coefficients d'Oslo (pages 86 à 373 du Rapport 340-4 (Genève, 1983)) sont utilisées pour déterminer la MUF de référence de la couche F2. Les nomogrammes (Fig. 14 et 15) sont utilisés pour déterminer la MUF de référence des couches E ou F1 (voir la Partie 3). L'indice R_{12} est à utiliser dans tous les calculs où intervient un indice solaire. Dans le cas de la couche F2 uniquement, F2(ZÉRO)MUF et F2(4000)MUF ne doivent pas être extrapolées pour des valeurs de R_{12} supérieures à 150 car, au-delà de cette valeur, la MUF de référence de la couche F2 n'augmente pas sensiblement avec R_{12} .

La distance le long de l'arc de grand cercle se calcule comme il est dit au § 9.2 ci-après. Le § 9.3 s'applique aux liaisons de longueur inférieure à 4000 km; pour les liaisons plus longues, il faut suivre la méthode décrite au § 9.4. Chaque cas est illustré par des exemples.

9.2 Détermination de la longueur de la liaison

A l'aide de la carte du monde (Fig. 10) et du tracé de grands cercles (Fig. 11), on détermine la longueur de la liaison comme suit:

- placer une feuille de papier transparent sur la carte du monde (Fig. 10) et tracer l'équateur et le méridien de Greenwich;
- marquer l'emplacement de l'émetteur et celui du récepteur;
- placer le calque sur le tracé de grands cercles (Fig. 11). Superposer les équateurs et faire glisser le calque horizontalement jusqu'à ce que les deux emplacements se trouvent sur un même grand cercle, c'est-à-dire sur une même ligne en trait plein, ou bien éloignés dans les mêmes proportions de deux lignes en trait plein consécutives. Dessiner le trajet du grand cercle en suivant cette ligne;
- en utilisant les lignes en trait mixte (distantes de 1000 km les unes des autres) et les lignes intermédiaires en pointillé (distantes de 500 km), estimer la distance D le long de l'arc de grand cercle;
- si D est inférieur à 4000 km, passer au § 9.3; sinon, passer au § 9.4.

9.3 Liaisons de longueur inférieure à 4000 km

La MUF de référence pour une liaison de longueur égale ou inférieure à 3400 km est la plus grande de la MUF de référence pour le mode E ou F1 et de celle pour le mode F2. Pour les liaisons comprises entre 3400 et 4000 km, on utilise uniquement le mode F2. La FOT du circuit est la plus grande de la FOT relative au mode F2 et de celle relative au mode E ou F1. Dans certains cas, il se peut que la FOT ne corresponde pas au même mode que la MUF de référence. Les variations d'un jour à l'autre de la MUF de référence pour E ou F1 étant négligeables, on peut, pour les besoins de la planification à grande distance, simplifier le calcul de la FOT relative à ces couches en admettant qu'elle est égale à la MUF de référence. Pour la couche F2, on peut simplifier le calcul de la FOT en multipliant la MUF de référence médiane mensuelle par 0,85.

Les étapes du calcul manuel de la MUF de référence et de la FOT sont alors les suivantes: (Le Tableau II donne un exemple de présentation des données sous forme de tableau. Cet exemple concerne la liaison Moscou (URSS)-Luechow (République fédérale d'Allemagne) (arc de grand cercle = 1710 km).)

- a) Marquer sur le calque le point milieu du trajet en utilisant la carte du monde (Fig. 10); inscrire la latitude et la longitude de ce point (55,1° N, 23,8° E en l'occurrence).
- b) Se reporter aux diagrammes de F2(ZÉRO)MUF et de F2(4000)MUF pour $R_{12} = 0$ et 100 (par exemple, pour juillet, pages 230 à 253 du Rapport 340-4 (Genève, 1983)). Placer le calque sur les quatre diagrammes pour chaque heure UTC de la colonne (1), en superposant les équateurs et les méridiens de Greenwich. Lire la fréquence au point milieu du trajet sur le calque. Inscrire ces valeurs de la MUF dans les colonnes (2), (3), (5) ou (6), selon le cas.
- c) Calculer F2(ZÉRO)MUF et F2(4000)MUF pour la valeur voulue de R_{12} en utilisant la relation linéaire ci-après pour interpoler ou extrapoler les valeurs du tableau. Se limiter, pour R_{12} , à la valeur 150.

$$\text{MUF} = \text{MUF}_0 + 0,01 R_{12} (\text{MUF}_{100} - \text{MUF}_0) \quad (9.1)$$

Inscrire les valeurs dans les colonnes (4) ou (7), selon le cas. L'interpolation peut aussi se faire à l'aide de papier quadrillé à graduation linéaire.

- d) Sur le nomogramme (Fig. 12), repérer les valeurs F2(ZÉRO)MUF et F2(4000)MUF déduites de l'étape c) précédente et inscrites dans les colonnes (4) et (7), lire la valeur F2(D)MUF, soit sur l'échelle de F2(ZÉRO)MUF soit sur l'échelle de F2(4000)MUF, correspondant à la longueur D de l'arc de grand cercle et l'inscrire dans la colonne (8).
- e) Calculer la FOT relative au mode F2 en multipliant la MUF, colonne (8), par le facteur 0,85 ou en utilisant l'échelle de conversion donnée dans la Fig. 13. Inscrire cette valeur F2(D)FOT dans la colonne (9).
- f) Choisir le diagramme de la distance zénithale du Soleil correspondant au mois considéré (par exemple, juillet dans la page 383 du Rapport 340-4 (Genève, 1983)). Placer le calque sur ce diagramme en superposant les équateurs. Placer le méridien de Greenwich sur l'heure locale 00 du diagramme et, au point milieu, lire la distance zénithale du Soleil à 0000 UTC. Répéter l'opération pour chaque heure UTC et noter dans la colonne (10) la distance zénithale du Soleil χ .
- g) Porter sur le nomogramme (Fig. 14) les valeurs de χ et de R_{12} . Lire la valeur de foE pour chaque heure UTC et l'inscrire dans la colonne (11).
- h) Convertir les résultats de l'étape g) ci-dessus pour obtenir la E/F1(D)MUF pour la distance D le long du grand cercle, en utilisant le nomogramme de la Fig. 15. L'inscrire dans la colonne (12). Ce nomogramme comprend un facteur pour la propagation par la couche F1 entre 2000 et 3400 km.
- j) La MUF de référence de la liaison est la plus grande des valeurs portées dans les colonnes (8) et (12). L'inscrire dans la colonne (13).
- k) La FOT de la liaison est la plus grande des valeurs portées dans les colonnes (9) et (12). L'inscrire dans la colonne (14).

Note. — On suppose que la FOT pour le mode E ou F1 est égale à la MUF de référence pour le mode E ou F1.

9.4 Liaisons de longueur supérieure à 4000 km

La MUF de référence de la liaison est déterminée au moyen de la méthode des deux points directeurs. On tient compte du seul mode de propagation par la couche F2, car la probabilité pour que la MUF sur de longs trajets dépende de la couche E est si faible que le mode F2 est suffisant. Pour calculer la FOT, on fait le produit de la F2 MUF par un facteur constant, égal à 0,85. Pour la planification des liaisons à grande distance, cette valeur de la FOT est jugée appropriée. Les étapes du calcul manuel de la MUF de référence et de la FOT sont alors les suivantes: (Le Tableau III donne un exemple de présentation des données. Cet exemple concerne la liaison de Kauai (Hawaii) à Hiraiso (Japon) (arc de grand cercle = 5910 km).)

- a) Au moyen du tracé de grands cercles (Fig. 11), indiquer l'emplacement des points directeurs de la couche F2, A et B, à 2000 km de chaque extrémité. Déterminer la latitude et la longitude de chacun de ces points en utilisant la carte du monde (Fig. 10) et les inscrire sur le tableau.

- b) Se reporter aux diagrammes de F2(4000)MUF pour $R_{12} = 0$ et 100 (par exemple pour janvier, pages 86 à 109 du Rapport 340-4 (Genève, 1983)). Placer le calque sur les cartes du bas de la page correspondant à chaque heure UTC de la colonne (1), en superposant les équateurs et les méridiens de Greenwich. Lire les fréquences aux deux points directeurs de la couche F2. Inscrive ces valeurs de la MUF dans les colonnes (3) ou (4), selon le cas.
- c) Calculer F2(4000)MUF pour la valeur voulue de R_{12} en utilisant la relation linéaire ci-après pour interpoler ou extrapoler les valeurs du tableau. Se limiter, pour R_{12} , à la valeur 150.

$$\text{MUF} = \text{MUF}_0 + 0,01 R_{12} (\text{MUF}_{100} - \text{MUF}_0) \quad (9.2)$$

Inscrire la valeur dans la colonne (5). L'interpolation peut aussi se faire à l'aide de papier quadrillé à graduation linéaire.

- d) La MUF de référence de la liaison est la plus petite des deux MUF pour les deux points A et B. Inscrive cette valeur dans la colonne (6).
- e) Calculer la FOT de la liaison en multipliant la MUF de référence de la liaison (colonne (6)) par le facteur 0,85 ou en utilisant l'échelle de conversion donnée dans la Fig. 13. Inscrive la FOT de la liaison dans la colonne (7).

TABLEAU II — Exemple d'estimation manuelle de la MUF de référence et de la FOT pour une liaison de longueur inférieure à 4000 km

Juillet

$R_{12} = 40$

Arc de grand cercle = 1710 km

Moscou (URSS): 55,8° N-37,3° E

à Luechow (Rép. féd. d'Allemagne): 53,0° N-11,2° E

Point milieu du trajet: 55,1° N-23,8° E

UTC	F2(ZÉRO)MUF			F2(4000)MUF			F2 (D) MUF	F2 (D) FOT	Distance zénithale (degrés)	foE	E/F1 (D) MUF	MUF de la liaison	FOT de la liaison
	$R_{12} = 0$	$R_{12} = 100$	$R_{12} = 40$	$R_{12} = 0$	$R_{12} = 100$	$R_{12} = 40$							
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
0000	3,7	5,9	4,6	10,3	16,2	12,7	8,4	7,1	101	0,95	4,7	8,4	7,1
0200	3,6	5,6	4,4	10,0	15,5	12,2	8,1	6,9	92	1,43	7,0	8,1	7,0
0400	4,4	6,1	5,1	13,0	17,0	14,6	9,6	8,2	77	2,44	12,0	12,0	12,0
0600	5,0	7,0	5,8	15,0	19,7	16,9	11,1	9,4	61	2,95	14,5	14,5	14,5
0800	5,3	7,2	6,1	15,8	20,3	17,6	11,6	9,9	45	3,24	15,9	15,9	15,9
1000	5,4	7,5	6,2	16,2	21,0	18,1	11,9	10,1	35	3,37	16,3	16,3	16,3
1200	5,1	7,2	5,9	15,5	20,5	17,5	11,5	9,8	39	3,32	16,0	16,0	16,0
1400	5,0	7,0	5,8	14,8	19,8	16,8	11,1	9,4	62	2,92	14,3	14,3	14,3
1600	5,0	7,0	5,8	15,5	20,6	17,5	11,5	9,8	69	2,73	13,3	13,3	13,3
1800	5,3	7,3	6,1	17,0	22,0	19,0	12,3	10,5	85	2,00	9,8	12,3	10,5
2000	5,4	7,3	6,2	17,0	21,5	18,8	12,2	10,4	96	1,19	5,8	12,2	10,4
2200	4,3	6,5	5,2	13,0	18,5	15,2	10,0	8,5	102	0,91	4,5	10,0	8,5

TABLEAU III — Exemple d'estimation manuelle de la MUF de référence et de la FOT pour une liaison de plus de 4000 km

Janvier

$R_{12} = 125$

Arc de grand cercle = 5910 km

Kauai (Hawaii): 22,0° N-159,8° O

à Hiraïso (Japon): 36,4° N-140,6° E

Points directeurs: A: 30° N-178° O

B: 35° N-163° E

UTC	Point directeur	F2(4000)MUF			MUF de la liaison	FOT de la liaison
		$R_{12} = 0$	$R_{12} = 100$	$R_{12} = 125$		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
0000	A	27,5	36,5	38,8	37,9	32,2
	B	25,0	35,3	37,9		
0200	A	26,5	36,0	38,4	36,5	31,0
	B	25,5	34,3	36,5		
0400	A	22,0	33,8	36,8	35,5	30,2
	B	23,0	33,0	35,5		
0600	A	16,0	25,8	28,3	28,3	24,1
	B	18,2	29,8	32,7		
0800	A	11,8	20,5	22,7	22,7	19,3
	B	12,0	22,0	24,5		
1000	A	10,6	15,6	16,9	16,9	14,4
	B	10,9	16,0	17,3		
1200	A	11,5	13,5	14,0	12,6	10,7
	B	10,6	12,2	12,6		
1400	A	11,8	12,2	12,3	12,1	10,3
	B	10,7	11,8	12,1		
1600	A	9,2	9,9	10,1	10,1	8,6
	B	10,5	11,7	12,0		
1800	A	10,2	13,5	14,3	9,6	8,2
	B	9,0	9,5	9,6		
2000	A	21,0	33,0	36,0	17,8	15,1
	B	13,8	17,0	17,8		
2200	A	26,0	38,0	41,0	34,8	29,6
	B	21,0	32,0	34,8		

PARTIE 10

**DIAGRAMMES POUR L'ÉVALUATION DE F2(ZÉRO)MUF,
F2(4000)MUF ET LA DISTANCE ZÉNITHALE DU SOLEIL**

Les diagrammes de F2(ZÉRO)MUF, F2(4000)MUF et la distance zénithale du Soleil sont présentés aux pages suivantes de l'Annexe au Rapport 340-4 (Genève, 1983).

Diagrammes de F2(ZÉRO)MUF et F2(4000)MUF

Mois	Temps universel (h)											
	0000	0200	0400	0600	0800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200
	Les pages indiquées ci-dessous correspondent à $R_{12} = 0$; pour $R_{12} = 100$, ajouter 1 au numéro indiqué.											
Janvier	86	88	90	92	94	96	98	100	102	104	106	108
Février	110	112	114	116	118	120	122	124	126	128	130	132
Mars	134	136	138	140	142	144	146	148	150	152	154	156
Avril	158	160	162	164	166	168	170	172	174	176	178	180
Mai	182	184	186	188	190	192	194	196	198	200	202	204
Juin	206	208	210	212	214	216	218	220	222	224	226	228
Juillet	230	232	234	236	238	240	242	244	246	248	250	252
Août	254	256	258	260	262	264	266	268	270	272	274	276
Septembre	278	280	282	284	286	288	290	292	294	296	298	300
Octobre	302	304	306	308	310	312	314	316	318	320	322	324
Novembre	326	328	330	332	334	336	338	340	342	344	346	348
Décembre	350	352	354	356	358	360	362	364	366	368	370	372

	Page
Distance zénithale du Soleil, janvier - février	377-378
mars - avril	379-380
mai - juin	381-382
juillet - août	383-384
septembre - octobre	385-386
novembre - décembre	387-388

PARTIE 11

**MÉTHODE INFORMATIQUE D'ÉVALUATION DES VALEURS
MÉDIANES MENSUELLES DE LA MUF DE RÉFÉRENCE
ET DE LA FRÉQUENCE OPTIMALE DE TRAVAIL**

11.1 Introduction

Les valeurs médianes mensuelles de la MUF de référence et de la fréquence optimale de travail (FOT) sont respectivement évaluées comme les valeurs maximales de la MUF de référence et de la FOT pour les modes de propagation appropriés à la longueur de la liaison considérée. Les modes de propagation envisagés sont les suivants:

1F2	0-4000 km
modes F2 d'ordre supérieur	plus de 4000 km
1F1	2000-3400 km
1E	0-2000 km
2E	2000-4000 km.

11.2 Cartographie de la couche F2

Il existe deux jeux de coefficients: un jeu tridimensionnel à relation linéaire avec le cycle solaire et des coefficients pour chaque mois civil (coefficients numériques d'Oslo, 1966), et un jeu quinquadimensionnel à relation quadratique avec le cycle solaire, permettant de centrer sur un jour quelconque de l'année les prévisions des valeurs médianes mensuelles (coefficients numériques de New Delhi, 1970). On préfère utiliser les coefficients d'Oslo de 1966 pour évaluer la MUF de référence.

La cartographie est fonction d'un paramètre de latitude dépendant du champ magnétique terrestre. Il est de plus nécessaire d'évaluer la gyrofréquence des électrons f_H proportionnelle au champ. On utilise un modèle numérique de champ pour l'époque 1960.

11.3 Procédures de prévision pour le mode F2

11.3.1 Liaisons de 0 à 4000 km

Pour une distance de 0 km, la MUF de référence est donnée par la formule:

$$F2(ZÉRO)MUF = foF2 + f_H/2 \quad (11.1)$$

et, pour une distance de 4000 km, par la formule:

$$F2(4000)MUF = 1,1 \times foF2 \times M(3000)F2 \quad (11.2)$$

Les prévisions de la MUF entre 0 et 4000 km sont effectuées par interpolation entre $F2(ZÉRO)MUF$ et $F2(4000)MUF$, en appliquant le rapport de distance tiré de la Fig. 12. On utilise les caractéristiques ionosphériques au point milieu du trajet qui suit le grand cercle.

11.3.2 Liaisons de longueur supérieure à 4000 km

Des valeurs de $F2(4000)MUF$ sont déterminées pour deux points directeurs situés à 2000 km de chaque extrémité le long du grand cercle qui relie les deux extrémités du trajet. La MUF de la liaison est la plus faible des deux valeurs trouvées.

11.3.3 Relation avec le cycle solaire

Quand on utilise les coefficients numériques d'Oslo de 1966, on applique la procédure décrite au § 2.4.2 pour un nombre de taches solaires de 0 ou de 100. La MUF de référence correspondant au nombre R_{12} approprié est obtenue par interpolation ou extrapolation linéaire dans le cas de valeurs comprises entre 0 et 150. Lorsque R_{12} dépasse 150, on utilise la valeur 150.

11.4 Procédure de prévision pour le mode F1

La méthode de prévision de la MUF de référence pour la couche F1, pour des distances comprises entre 2000 et 3400 km, est exposée dans la Partie 4. La latitude géomagnétique et l'angle zénithal du Soleil sont déterminés pour le point milieu du trajet qui suit le grand cercle.

11.5 Procédure de prévision pour le mode E

La méthode de prévision de la MUF de référence pour la couche E, pour des distances comprises entre 0 et 2000 km, est exposée dans la Partie 3. On utilise la latitude et l'angle zénithal du Soleil au point milieu du trajet qui suit le grand cercle.

On admet que, pour les distances comprises entre 2000 et 4000 km, la 2E-MUF équivaut à $E(2000)MUF$ exprimée en fonction de foE au point milieu du trajet.

11.6 Prévision de la fréquence optimale de travail

Pour chaque mode, on évalue la FOT en fonction de la MUF de référence correspondante, en appliquant le facteur de conversion F_1 égal à 0,95 pour les modes E et F1, et comme l'indique le Tableau I du Supplément au Rapport 252 pour les modes F2. La valeur donnée de la FOT est la plus élevée des valeurs respectivement évaluées pour chacun des différents modes; elle peut parfois ne pas être applicable au même mode que celui pour lequel la MUF est indiquée dans le tableau.

11.7 Programme d'ordinateur

Le programme d'ordinateur MUFFY englobe les procédures définies ci-dessus et peut être obtenu en s'adressant au Directeur du CCIR. Les données comprennent les emplacements de l'émetteur et du récepteur. Le programme calcule le trajet le long de l'arc de grand cercle. Un spécimen de sortie imprimée est reproduit au Tableau IV. Comme l'indique la Résolution 63, il convient d'utiliser les bandes magnétiques de données 1 ou 3 pour les coefficients numériques d'Oslo, et la bande magnétique de données 2 pour les coefficients numériques de New Delhi.

TABLEAU IV – Exemple d'estimation par ordinateur de la MUF de référence et de la FOT

PROGRAM 'MUFFY' VERSION-JAN 82
 BASIC MUF AND FOT DETERMINATION IN ACCORDANCE WITH CCIR REPORT 340-4
 OSLO-FOF2 COEFFICIENTS

			MARCH	1979				SUNSPOT NO. 125.0				
SYDNEY			TO ADELAIDE					AZIMUTHS		MILES	KM	
33.92S	151.17E		34.92S	138.58E		260.95	88.09			720.5	1159.4	
SHORT PATH												
UT	MUF	FOT	UT	MUF	FOT	UT	MUF	FOT	UT	MUF	FOT	
01	15.7	13.9	07	15.1	13.1	13	10.4	8.4	19	7.8	6.4	
02	15.9	14.2	08	14.7	12.8	14	10.1	8.2	20	8.7	7.2	
03	15.8	14.2	09	13.8	11.9	15	9.7	7.9	21	10.9	9.5	
04	15.5	13.9	10	12.5	10.8	16	9.3	7.5	22	13.2	11.5	
05	15.4	13.4	11	11.3	9.7	17	8.8	7.2	23	14.7	12.8	
06	15.2	13.3	12	10.6	9.1	18	8.1	6.7	24	15.3	13.3	

PARTIE 12

HAUTEUR DE RÉFLEXION SPÉCULAIRE

Si l'on veut procéder à une estimation simplifiée des trajets des rayons obliques, on peut admettre que la réflexion se produit sur une surface équivalant à un miroir plan située à une hauteur h_T , donnée par Lockwood [1984] sous la forme:

$$h_T = 358 - (11 - 100a) \left(18,8 - \frac{320}{x^5} \right) + aD \left(0,03 + \frac{14}{x^4} \right) \quad \text{km} \quad (12.1)$$

Si la relation (12.1) conduit à une valeur de h_T supérieure à 500 km, on prend $h_T = 500$ km. Dans cette relation:

$$a = 0,04, \text{ ou } a = \frac{1}{M(3000)F2} - 0,24 \text{ si cette expression est supérieure à } 0,04,$$

$$x = 2, \text{ ou } x = \frac{foF2}{foE} \text{ si ce rapport est supérieur à } 2,$$

D : portée au sol en kilomètres.

Lorsque le rapport de la fréquence de l'onde à la MUF de référence est compris entre 0,80 et 0,95, alors que $hmF2$ est compris entre 250 et 500 km et que x est supérieur à 2, la relation (12.1) donne des résultats exacts à moins de 10% près. On peut utiliser cette relation avec des fréquences plus basses et de plus faibles valeurs de x , mais la précision est alors réduite.

Des valeurs fournies par la relation (12.1), on peut déduire des expressions simplifiées, dont l'une convient de nuit (distance zénithale du Soleil χ égale ou supérieure à 90°) et l'autre de jour (distance zénithale du Soleil inférieure à 90°). Ce sont:

$$\text{pour la nuit: } h_T = \frac{1880}{M(3000)F2} - 300 \quad \text{km} \quad (12.2)$$

$$\text{pour le jour: } h_T = 160 + (0,143D + 1800) \left\{ \frac{1}{M(3000)F2} - 0,24 \right\} \quad \text{km} \quad (12.3)$$

En utilisant celle de ces deux relations qui convient, on obtient, lorsque $x > 3$, des erreurs sur h_T inférieures à 5%.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

LOCKWOOD, M. [1984] Simplified estimation of raypath mirroring height for HF radio waves reflected from the ionospheric F region. *Proc. IEE*, Vol. 131, Part F, 2, 117.

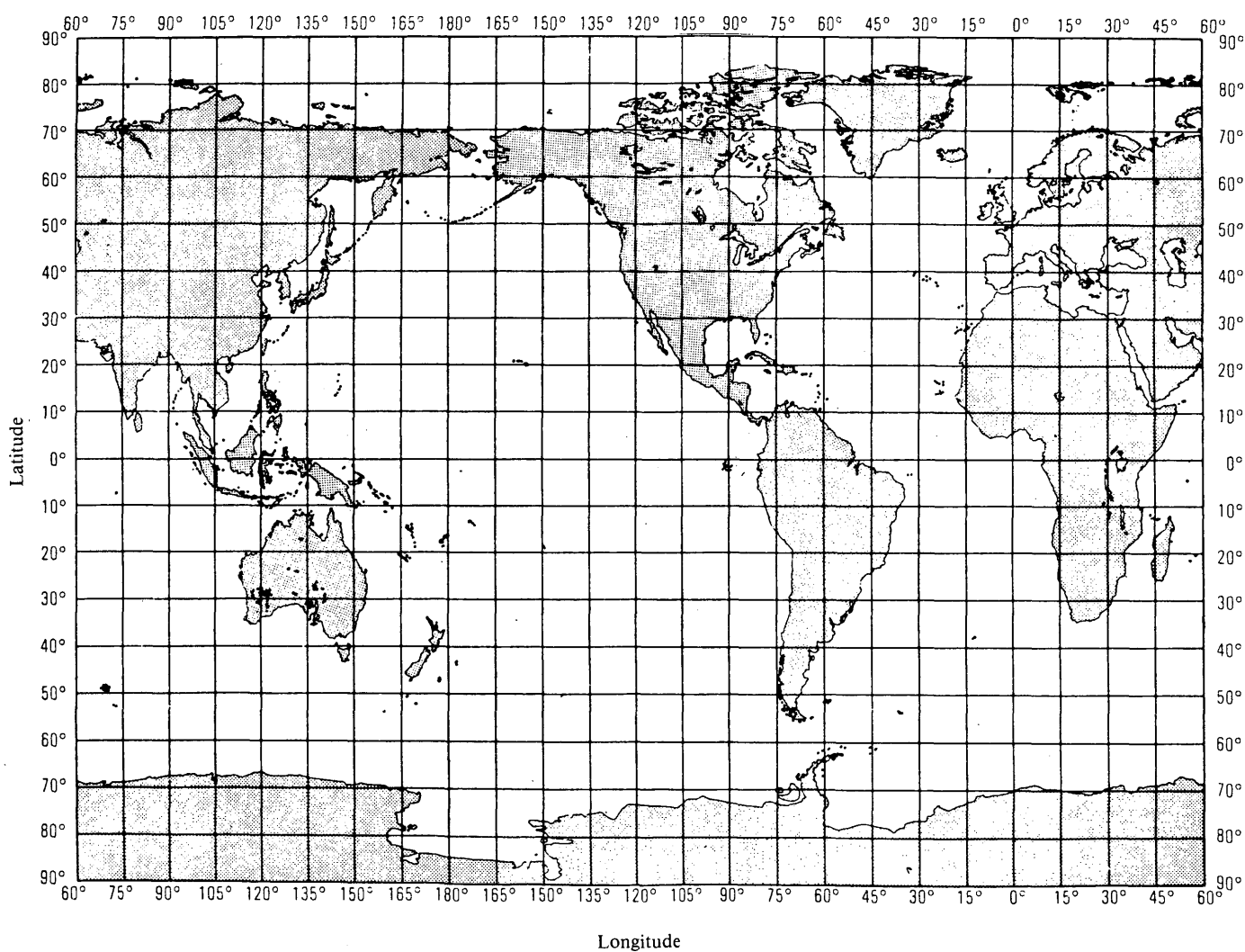


FIGURE 10 — Carte du monde en projection cylindrique modifiée

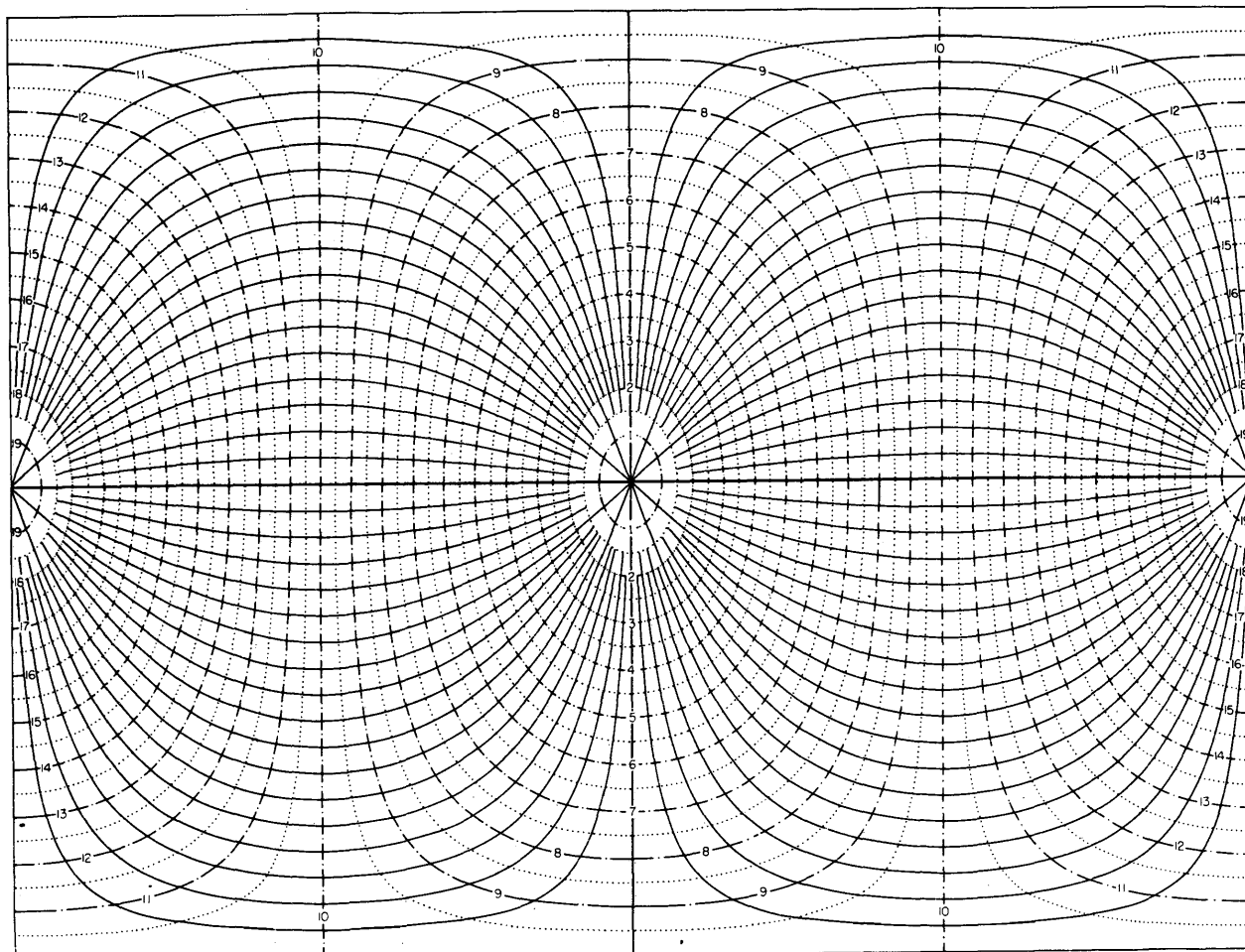


FIGURE 11 — *Tracé de grands cercles ayant leur centre sur l'équateur, pour carte du monde en projection cylindrique modifiée*
 (Les lignes en trait plein représentent des grands cercles. Les lignes numérotées en trait mixte indiquent les distances en milliers de kilomètres)

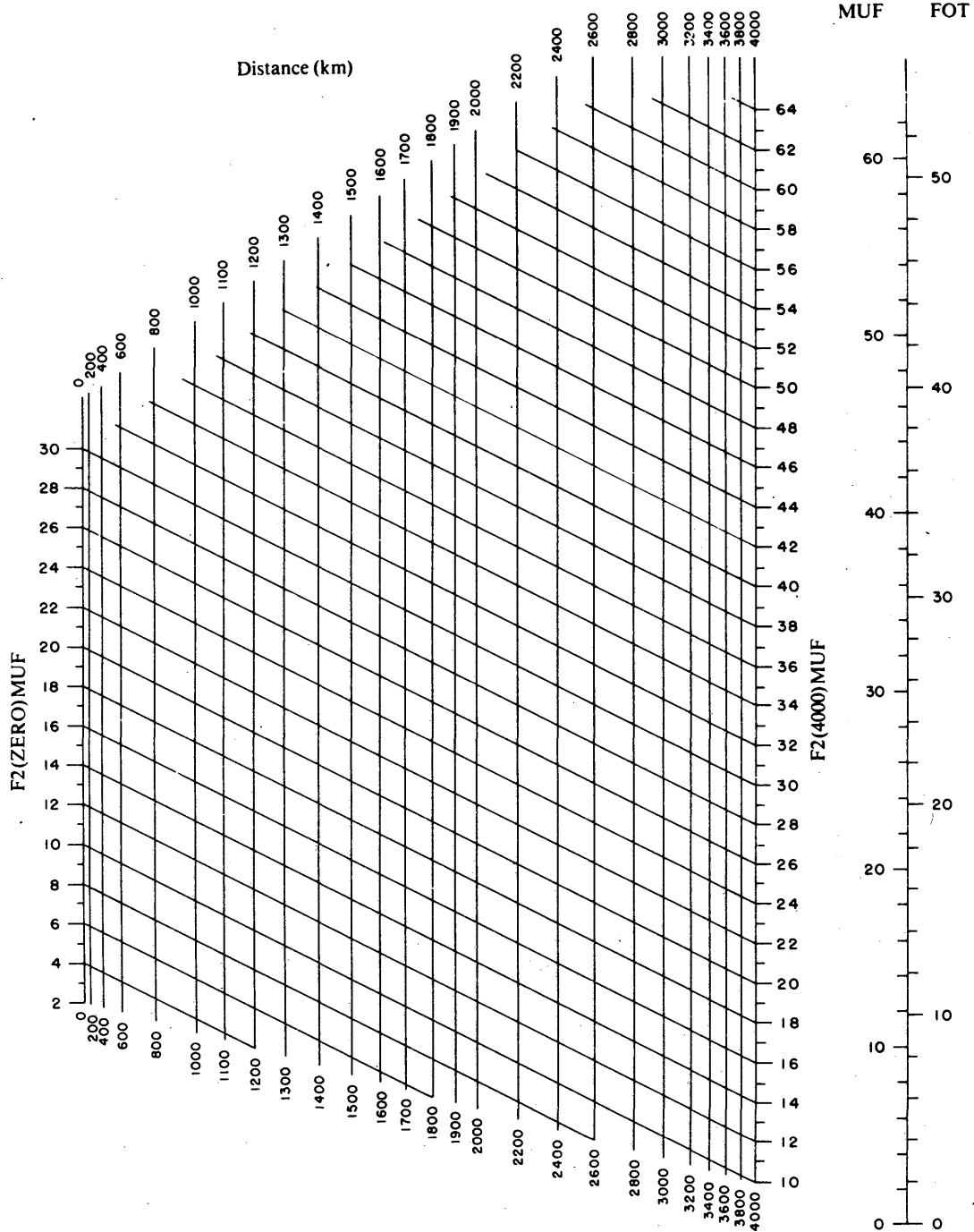


FIGURE 12 — Nomogramme permettant de transformer la $F_2(\text{ZERO})\text{MUF}$ et la $F_2(4000)\text{MUF}$ en fréquences maximales utilisables de référence équivalentes pour des distances de transmission intermédiaires

FIGURE 13
Echelle de conversion permettant d'obtenir la fréquence optimale de travail (FOT)

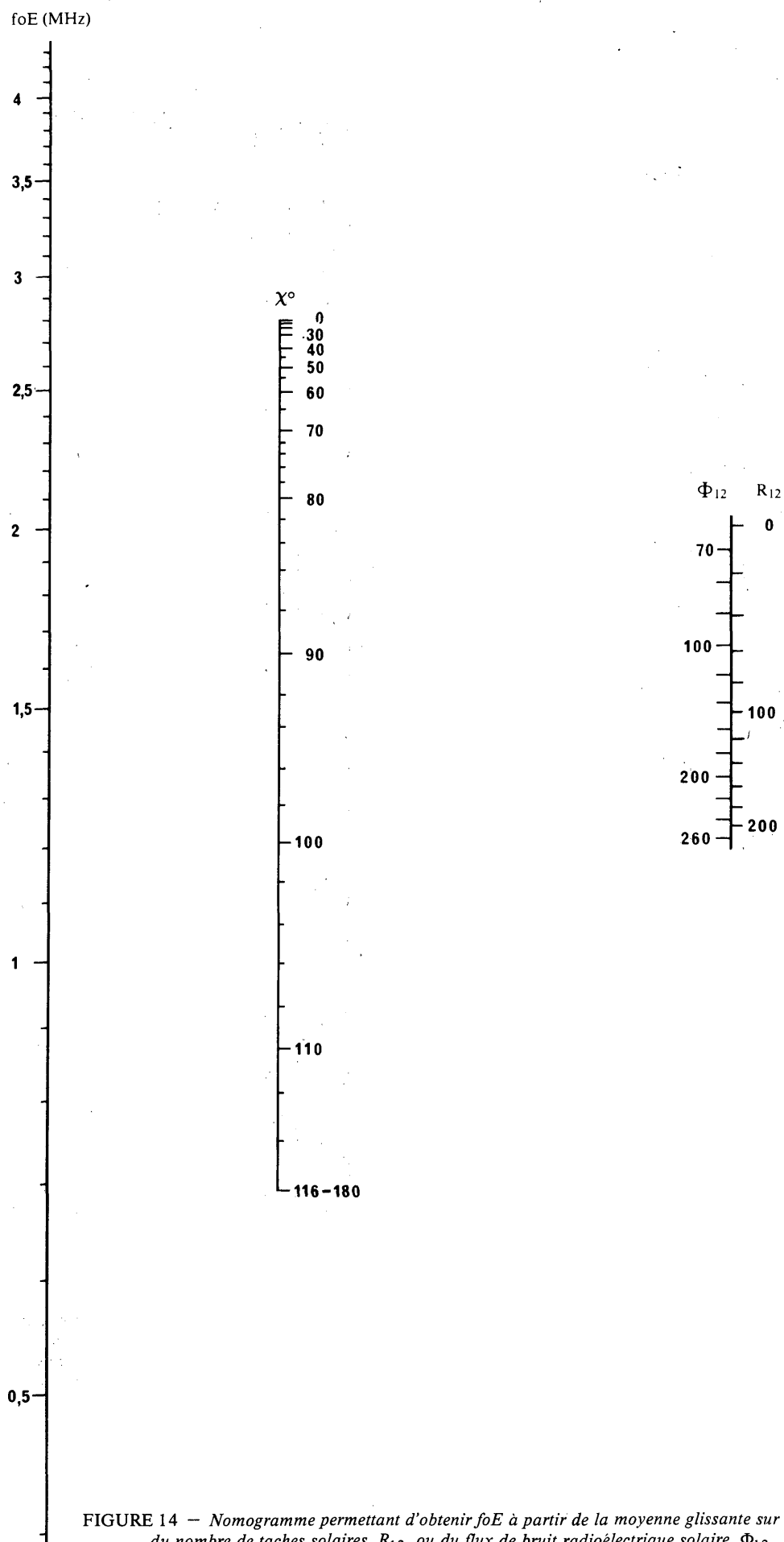


FIGURE 14 — Nomogramme permettant d'obtenir f_oE à partir de la moyenne glissante sur 12 mois du nombre de taches solaires, R_{12} , ou du flux de bruit radioélectrique solaire, Φ_{12} , et la distance zénithale du Soleil χ

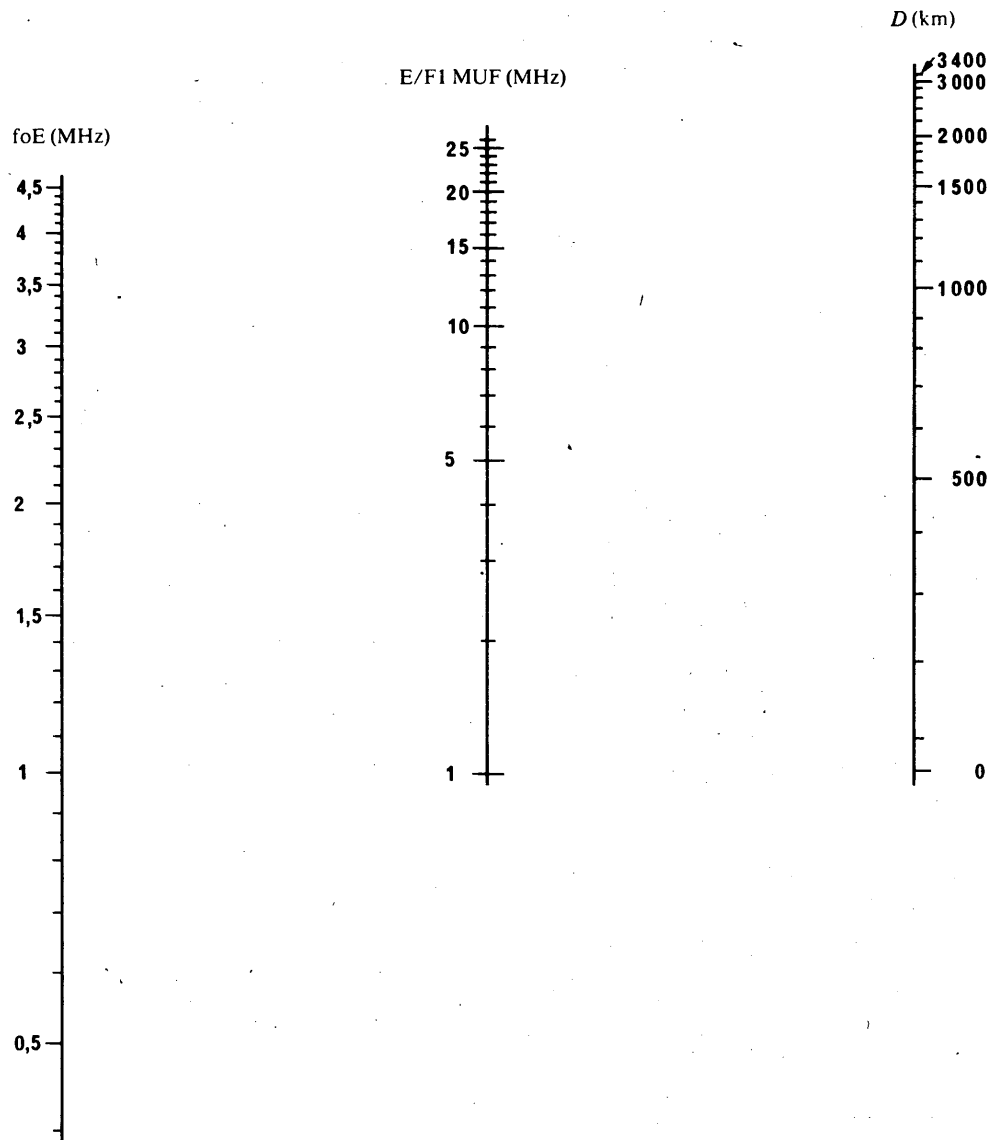


FIGURE 15 — Nomogramme pour déterminer la valeur de la MUF de référence pour les couches E ou F1, pour une distance D , par conversion de f_oE

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

REPORT 340-5

CCIR ATLAS OF IONOSPHERIC CHARACTERISTICS

(Recommendation 434)

(1966-1970-1974-1978-1982-1986)

PART 1

GENERAL

1.1 Introduction

The purpose of the CCIR Atlas of Ionospheric Characteristics is to present a standard compendium of some basic ionospheric characteristics determining ionospheric radio propagation. Since our current knowledge of ionospheric characteristics and the various mechanisms involved in ionospheric radio propagation is far from complete, this Atlas must be regarded as provisional. Further improved editions may be issued as future progress is made in understanding ionospheric physics and the mechanisms of ionospheric radio propagation.

The CCIR Atlas of Ionospheric Characteristics is available in two alternative forms. The first form gives the coefficients of the numerical mapping functions of the F2-layer characteristics and is available from the Director, CCIR, on magnetic tape, together with programs for computing the functions. The E- and F1-layer characteristics are also given as a series of formulae. This form is provided for use by international organizations, such as the IFRB, and by others who require the solution of various ionospheric radio-propagation problems, or who have a large amount of routine, repetitive computations. The Atlas in this form permits the user to take advantage of the convenience, economy and accuracy of computational techniques.

A second form of the Atlas appears in this Report, where the F2-layer characteristics are presented as a set of charts. These charts were computed from the numerical map functions included in the first form of the Atlas. The charts are provided for use by those who do not have access to a computer or who require a fast and simple solution for long-range planning purposes.

The F2-layer characteristics occupy a major part of this Report, partly because the F2 layer is of primary importance in determining long distance HF radio propagation. Also, the complex geographical, diurnal, seasonal, and solar cycle variations of the F2 layer require a considerable number of charts for adequate representation. Included are nomograms and charts of the solar zenith angle for determining the characteristics of the regular E layer and nomograms and a chart of geomagnetic latitude for determining the characteristics of the regular F1 layer. This information on F2-layer, F1-layer and regular E-layer characteristics provides a useful standard basis for computations of ionospheric radio propagation. Additional information on sporadic E, the minimum virtual heights of the F1 and F2 layers, and spread F are available only as numerical coefficients.

The basic information may be applied to a wide variety of problems. Additional information from other sources, such as atmospheric radio noise, absorption and antenna characteristics, will often be required for a particular problem. There may be considerable variation among the users, both in the types of problem to be solved and in preferred methods of computation. Computer programs are available for the solution of many ionospheric radio propagation problems. Some are listed in Resolution 63 and others may be found in the publications of a number of administrations.

1.2 Terminology

In general, the terminology used conforms to the recommendations of the World Wide Soundings Committee [Piggott and Rawer, 1972 and 1978] and to accepted practice in the literature, for example, Davies [1965] and Al'pert [1960].

The term "operational MUF" is the highest frequency that would permit acceptable operation of a radio service between given terminals at a given time under specified working conditions (such as, antenna types, transmitter power, class of emission, information rate and required signal-to-noise ratio).

The term "basic MUF" is the highest frequency at which a radio wave can propagate between given terminals, on a specified occasion, by ionospheric refraction alone.

The term "numerical map" is used to denote a function, $\Omega(\lambda, \theta, T)$, of three variables (latitude, λ , longitude, θ and time, T) which represents the world-wide geographic and diurnal variations of an ionospheric characteristic. The term "chart" is used to denote the graphical representation of variations of an ionospheric characteristic for a specified time by contour lines superimposed on a geographical map or other coordinate grid. It must be emphasized that a set of charts for various universal times is derived from the one "numerical map".

1.3 Prediction of solar and ionospheric indices

The use of this Report requires predictions of the solar indices R_{12} and Φ_{12} . Predicted and measured values of these solar indices and ionospheric indices are published monthly in the circulars of the CCIR as well as in the Telecommunication Journal. Definitions of these indices and their inter-relationships are given in Recommendation 371.

REFERENCES

- AL'PERT, Ya. L. [1960] *Radio Wave Propagation and the Ionosphere* (in Russian). Academy of Sciences of the USSR.
- DAVIES, K. [1965] *Ionospheric radio propagation*. National Bureau of Standards Monograph 80, US Government Printing Office, Washington, DC 20402.
- PIGGOTT, W. R. and RAWER, K. [1972] *URSI Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction* (2nd Ed.). World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics. Report UAG-23, NOAA, Boulder, CO 80303, USA. Spanish text available from LIARA (Argentina) and French text available from CNET (France).
- PIGGOTT, W. R. and RAWER, K. [1978] *URSI Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction* (2nd Ed.). Revision of chapters 1-4. World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics. Report UAG-23A, NOAA, Boulder, CO 80303, USA.

PART 2

PREDICTED F2-LAYER NUMERICAL MAPS AND CHARTS

2.1 Data

The information on which the F2-layer numerical map functions and charts are based was derived from soundings at vertical incidence of the ionosphere at a large number of ground stations all over the world. These stations, operated by laboratories in many different countries, use standard methods for reducing the observations [Piggott and Rawer, 1972 and 1978]. During the International Geophysical Year, the number of ionospheric stations greatly increased, providing observations at many new locations that filled many large gaps in the world network. However, there are still many large areas of the world, notably the oceans, for which little or no data are available. In spite of these gaps, world coverage of the observations is sufficient to permit reasonably good representation of the major features of the world variations of ionospheric characteristics.

The basic data used for the F2-layer characteristics presented in this Atlas are foF2, the ordinary ray critical frequency at vertical incidence of the F2 layer, and M(3000)F2, a numerical factor which, when multiplied by foF2, gives the basic MUF for a distance of 3000 km. M(3000)F2 is derived from vertical incidence ionograms by use of a standard transmission curve or other equivalent methods [Piggott and Rawer, 1972 and 1978; Davies, 1965].

Both foF2 and M(3000)F2 vary considerably from day to day around their monthly median values. The monthly median values, however, show fairly regular and systematic geographical, diurnal, seasonal and solar cycle variations. The F2-layer numerical maps and charts of this Atlas were prepared by use of monthly median values of foF2 and M(3000)F2 for all available ionospheric stations.

Data for five years, 1954, 1955, 1956, 1957 and 1958 were analysed month by month. These years were typical of a period from solar cycle minimum to maximum. In addition to data from stations actually operating in those years, it was possible to use, as supplemental data, observations from stations that were in operation in other years, to fill some large gaps in world coverage. This was particularly helpful for 1954, a period of solar cycle minimum. The use of data from 1964, also a solar cycle minimum year, to supplement the 1954 data was necessary to provide sufficient data for mapping most of the southern hemisphere.

2.2 Numerical mapping

The method of numerical mapping used to prepare the charts in this Report and the F2-layer numerical maps was developed by Jones and Gallet [1960, 1962a, 1962b and 1965]. The data analysis was made in universal time rather than in local time and a modified magnetic dip was used as the main latitude coordinate instead of geographic latitude [Jones *et al.*, 1969]. These changes have resulted in a substantial improvement in the representation. The original papers should be consulted for details of the mathematical methods, as well as interpretation and use in practical applications. The following brief description of the numerical map function, $\Omega(\lambda, \theta, T)$, is presented, to indicate the nature and meaning of the numerical map coefficients of the F2-layer characteristics used to prepare the charts in this Atlas.

The general form of the numerical map function, $\Omega(\lambda, \theta, T)$, is the Fourier time series:

$$\Omega(\lambda, \theta, T) = a_0(\lambda, \theta) + \sum_{j=1}^H [a_j(\lambda, \theta) \cos jT + b_j(\lambda, \theta) \sin jT] \quad (2.1)$$

where:

λ : geographic latitude ($-90^\circ \leq \lambda \leq 90^\circ$),

θ : east geographic longitude ($0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$)
(θ in degrees east of the Greenwich meridian),

T : universal time (UTC) expressed as an angle ($-180^\circ \leq T \leq 180^\circ$),

H : the maximum number of harmonics used to represent the diurnal variation.

The Fourier coefficients, $a_j(\lambda, \theta)$ and $b_j(\lambda, \theta)$, vary with the geographic coordinates, and are represented by series of the form:

$$a_j(\lambda, \theta) = \sum_{k=0}^K U_{2j,k} G_k(\lambda, \theta), j = 0, 1, 2, \dots, H \quad (2.2a)$$

$$b_j(\lambda, \theta) = \sum_{k=0}^K U_{2j-1,k} G_k(\lambda, \theta), j = 1, 2, \dots, H \quad (2.2b)$$

The particular choice of the functions, $G_k(\lambda, \theta)$, is determined by specifying the integers k ($k_0, k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_m; k_m = K$) where i is the order in longitude. Therefore, a numerical map can be written more explicitly in the form:

$$\Omega(\lambda, \theta, T) = \sum_{k=0}^K U_{0,k} G_k(\lambda, \theta) + \sum_{j=1}^H \left[\cos jT \sum_{k=0}^K U_{2j,k} G_k(\lambda, \theta) + \sin jT \sum_{k=0}^K U_{2j-1,k} G_k(\lambda, \theta) \right] \quad (2.3)$$

$U_{2j,k}$ and $U_{2j-1,k}$ in equations (2.2a), (2.2b) and (2.3) can be written as $U_{s,k}$ where s is either $2j$ or $2j-1$.

In the numerical mapping technique, a function:

$$I' = I / \sqrt{\cos \lambda} \quad (2.4)$$

has been used, where I is the magnetic dip and λ is the geographic latitude [Rawer, 1963]. To eliminate the singularities of I' at the geographic poles, $X = \arctan I'$ was used in data analyses as a modified dip for numerical mapping of the F2-layer parameters. Since X is a function of both geographic latitude and longitude, the formal expression of $\Omega(\lambda, \theta, T)$, equation (2.3), is unchanged. Table I shows the geographic functions, $G_k(\lambda, \theta)$.

The use of the modified magnetic dip as the main latitude coordinate resulted in a better world representation of the ionospheric variations, particularly in equatorial and polar regions. After the data analyses, the coordinates of the representation were transformed by the computer programme to geographic latitude and longitude for use in preparing the charts in this Atlas.

TABLE 1 — Geographic coordinate functions $G_k(\lambda, \theta)$ (X is a function of λ and θ , m is the maximum order in longitude)

$$q_0 = k_0; q_i (i = 1, m) = \frac{k_i - k_{i-1} - 2}{2}$$

k	Main latitude variation	k	First order longitude	k	Second order longitude	...	k	m th order longitude
0	1	$k_0 + 1$	$\cos \lambda \cos \theta$	$k_1 + 1$	$\cos^2 \lambda \cos 2 \theta$	...	$k_{m-1} + 1$	$\cos^m \lambda \cos m \theta$
1	$\sin X$	$k_0 + 2$	$\cos \lambda \sin \theta$	$k_1 + 2$	$\cos^2 \lambda \sin 2 \theta$	...	$k_{m-1} + 2$	$\cos^m \lambda \sin m \theta$
2	$\sin^2 X$	$k_0 + 3$	$\sin X \cos \lambda \cos \theta$	$k_1 + 3$	$\sin X \cos^2 \lambda \cos 2 \theta$	...	$k_{m-1} + 3$	$\sin X \cos^m \lambda \cos m \theta$
.		$k_0 + 4$	$\sin X \cos \lambda \sin \theta$	$k_1 + 4$	$\sin X \cos^2 \lambda \sin 2 \theta$	...	$k_{m-1} + 4$	$\sin X \cos^m \lambda \sin m \theta$
.		.	.	.	.	.	.	.
k_0	$\sin^{q_0} X$	$k_1 - 1$	$\sin^{q_1} X \cos \lambda \cos \theta$	$k_2 - 1$	$\sin^{q_2} X \cos^2 \lambda \cos 2 \theta$	...	$k_m - 1$	$\sin^{q_m} X \cos^m \lambda \cos m \theta$
		k_1	$\sin^{q_1} X \cos \lambda \sin \theta$	k_2	$\sin^{q_2} X \cos^2 \lambda \sin 2 \theta$	...	k_m	$\sin^{q_m} X \cos^m \lambda \sin m \theta$

2.3 Coefficients of foF2 and M(3000)F2

2.3.1 Oslo coefficients

The first set of numerical coefficients defining the diurnal and geographical variations of foF2 (Oslo, 1966) [Jones *et al.*, 1969] is based on a linear relationship with solar activity. These coefficients are recommended for use for long-term frequency planning purposes. The coefficients that represent the monthly median values of foF2 and M(3000)F2 are the values of $U_{s,k}$ (see equations (2.2) and (2.3) of § 2.2) that define the function $\Omega(\lambda, \theta, T)$, of the numerical map of the given characteristic for the indicated month and level of solar activity. The coefficients are available for each month of the year, for foF2 and M(3000)F2, and for two levels of solar activity, $R_{12} = 0$ and $R_{12} = 100$. R_{12} is the twelve month smoothed mean value of the R_i monthly sunspot numbers and is used as an index of the level of solar activity. Coefficients were derived for each F2-layer characteristic for each month of the year for the years 1954, 1955, 1956, 1957 and 1958, using monthly median values of observed vertical incidence sounding data for all available ionospheric stations. The coefficients for $R_{12} = 0$ and $R_{12} = 100$ for a given month of the year were determined by fitting a straight line, by the method of least squares, to the values of each coefficient for that month for the five years. The value of each coefficient for $R_{12} = 0$ and $R_{12} = 100$ was calculated from the linear relationship. These coefficients should be used with caution for values of $R_{12} > 150$ (see § 2.4.2). The coefficients are available from the Director, CCIR.

The numerical maps based on the Oslo coefficients may also be used to estimate foF2 values by means of the ionospheric index IG [Liu *et al.*, 1983]. The procedure is to redefine the map reference values as $IG_{12} = 0$ and $IG_{12} = 100$, rather than $R_{12} = 0$ and $R_{12} = 100$. The value of foF2 for a given IG_{12} is then obtained by linear interpolation or extrapolation, using IG_{12} instead of R_{12} in equation (2.5). The linear relationship is applicable to the entire range of solar activity.

2.3.2 New Delhi coefficients

A second set of numerical coefficients defining the diurnal, geographical, seasonal and solar cycle variations of the critical frequency of the F2 layer (foF2) is available from the Director, CCIR. With this set of coefficients (New Delhi, 1970), the predicted monthly median values of foF2 can be centred on any given day of the year [Jones and Obitts, 1970]. A second degree polynomial has been used to represent the solar cycle variation. These coefficients are recommended for use in short-term prediction programmes.

2.4 Charts of basic F2(ZERO)MUF and F2(4000)MUF

2.4.1 Description

F2(ZERO)MUF is the basic maximum usable frequency for zero distance, or vertical incidence. It corresponds to $f_x F_2$, the extraordinary ray critical frequency at vertical incidence. The predicted F2(ZERO)MUF values were derived by adding one-half the gyro-frequency to the value of foF2 calculated by use of the coefficients of the numerical maps for the corresponding month and value of R_{12} . The error of this approximation is generally not important compared to other uncertainties in these numerical maps and charts. It may be significant only when foF2 is near or below the gyro-frequency. If desired, the more precise expression from magneto-ionic theory may be applied to foF2 values calculated from the numerical map coefficients.

F2(4000)MUF is the basic maximum usable frequency for one-hop F2-layer propagation for a distance of 4000 km. The values of predicted F2(4000)MUF were obtained by multiplying the product of predicted foF2 and predicted M(3000)F2 by 1.1. The value 1.1 is the average ratio of M(4000)F2 to M(3000)F2.

Pages 86 to 373 of Report 340-4 (Geneva, 1983) present contour charts of F2(ZERO)MUF and F2(4000)MUF for every even hour of universal time, for each month of the year, and for $R_{12} = 0$ and $R_{12} = 100$. These were calculated from the corresponding numerical maps.

2.4.2 Interpolation — R_{12} and distance

For most purposes it is adequate to assume a linear relationship with R_{12} for both foF2 and M(3000)F2. The relationship of M(3000)F2 with R_{12} is effectively linear over the entire range of values of R_{12} .

Although the level of solar activity at which the relationship between foF2 and R_{12} becomes non-linear is a function of geographic location, time of day and season, the most noticeable departure from linearity is for values of R_{12} above approximately 150. For values of R_{12} greater than 150, the error can be reduced by assuming that higher values are effectively 150.

Using the linear relationship between R_{12} and foF2, we can interpolate between the values for $R_{12} = 0$ and $R_{12} = 100$ or extrapolate for $R_{12} > 100$ by:

$$foF2 = f_0 + 0.01(f_{100} - f_0)R_{12} \quad (2.5)$$

where f_0 is the value of foF2 for $R_{12} = 0$ and f_{100} is the value for $R_{12} = 100$.

Similarly:

$$M(3000)F2 = m_0 + 0.01(m_{100} - m_0)R_{12} \quad (2.6)$$

where m_0 is the value of M(3000)F2 for $R_{12} = 0$ and m_{100} is the value for $R_{12} = 100$. Similar relationships may be used to derive values of F2(ZERO)MUF and F2(4000)MUF for values of R_{12} other than 0 or 100.

A copy of the world map (Fig. 10) and of a great-circle chart (Fig. 11) drawn to the same scale as the contour charts, is provided to facilitate determination of path locations, great-circle distances and reflection points. To determine the value of F2-layer basic MUF for distances between 0 and 4000 km using the F2-layer charts, it is necessary to interpolate between values of F2(ZERO)MUF and F2(4000)MUF for a given location. The nomogram (Fig. 12) may be used for this purpose. For distances greater than 4000 km, either the two-control-point method (see Part 9) may be used, or the path may be divided into two or more hops of 4000 km long or less, as desired. If the latter alternative is chosen, two or more combinations of hops may be possible.

Part 9 presents a detailed manual method for determining the basic MUF, which includes the F2(D)MUF, for paths less than 4000 km and for paths greater than 4000 km.

Part 11 gives a corresponding computer version.

2.5 Evaluation of F2(D)MUF by computer

The nomogram (Fig. 12) gives F2(D)MUF in terms of F2(ZERO)MUF and F2(4000)MUF, where these factors are available from charts or in terms of the ionospheric characteristics foF2, M(3000)F2 and f_H . For computer applications, greater accuracy is achieved using equations developed by Lockwood [1983]:

$$F2(D)MUF = \left[1 + \left\{ \frac{C_D}{C_{3000}} \right\} \left\{ B - 1 \right\} \right] \cdot foF2 + \frac{f_H}{2} \left(1 - \frac{D}{4000} \right) \quad (2.7)$$

where:

$$C_D = 0.72 - 0.628z - 0.451z^2 - 0.03z^3 + 0.194z^4 + 0.158z^5 + 0.037z^6 \quad (2.8)$$

$$z = 1 - 2D/D_{max} \quad (2.9)$$

$$D_{max} = 3940 + \left\{ 9900 + \frac{15\,375}{x^2} + \frac{106\,700}{x^5} \right\} \left\{ \frac{1}{B} - 0.258 \right\} \quad (2.10)$$

and:

$$B = M(3000) - 0.124 + \left(M(3000)^2 - 4 \right) \left(0.0215 + 0.005 \sin \left\{ \frac{7.854}{x} - 1.9635 \right\} \right) \quad (2.11)$$

where:

D and D_{max} are in kilometres,

C_{3000} : value of C_D for $D = 3000$ km, and

$x = foF2/foE$, or 2, whichever is the larger.

2.6 Magnetic field model

A model of the Earth's magnetic field for epoch 1960 based on a sixth-order spherical-harmonic analysis [Jensen and Cain, 1962] is employed in order to determine modified magnetic dip and gyrofrequency required in the evaluation of the numerical maps. The 1960 epoch must be used, rather than some other epoch of interest because it is that used in generating the values of the numerical coefficients.

The magnetic induction F_x , F_y and F_z in gauss along the geographic north, east and vertically downwards directions respectively, is given by:

$$F_x = \sum_{n=1}^6 \sum_{m=0}^n x_n^m \left[g_n^m \cos m\theta + h_n^m \sin m\theta \right] R^{n+2} \quad (2.12a)$$

$$F_y = \sum_{n=1}^6 \sum_{m=0}^n y_n^m \left[g_n^m \sin m\theta - h_n^m \cos m\theta \right] R^{n+2} \quad (2.12b)$$

$$F_z = \sum_{n=1}^6 \sum_{m=0}^n z_n^m \left[g_n^m \cos m\theta + h_n^m \sin m\theta \right] R^{n+2} \quad (2.12c)$$

where:

$$x_n^m = \frac{d}{d\varphi} \left(P_{n,m}(\cos \varphi) \right) \quad (2.13a)$$

$$y_n^m = m \cdot \frac{P_{n,m}(\cos \varphi)}{\sin \varphi} \quad (2.13b)$$

$$z_n^m = -(n+1)P_{n,m}(\cos \varphi) \quad (2.13c)$$

with:

φ : northern co-latitude ($= 90^\circ - \lambda$), where λ is the geographic latitude in degrees (north positive, $-90^\circ \leq \lambda \leq 90^\circ$)

$P_{n,m}(\cos \varphi)$: associated Legendre function defined as:

$$P_{n,m}(\cos \varphi) = \sin^m \varphi \left[\cos^{n-m} \varphi - \frac{(n-m)(n-m-1)}{2(2n-1)} \cos^{n-m-2} \varphi + \frac{(n-m)(n-m-1)(n-m-2)(n-m-3)}{(2)(4)(2n-1)(2n-3)} \cos^{n-m-4} \varphi + \dots \right] \quad (2.14)$$

g_n^m and h_n^m : numerical coefficients for the field model in gauss.

R : height-dependent scaling factor given as:

$$R = \frac{6371.2}{6371.2 + h_r} \quad (2.15)$$

where:

h_r : height at which the field is evaluated (taken as 300 km).

The total magnetic field, F , is given as:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (2.16)$$

The magnetic dip, I , and gyrofrequency, f_H , in MHz are determined from:

$$I = \tan^{-1} \left(\frac{F_z}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}} \right) \quad (2.17)$$

and:

$$f_H = 2.8 F \quad (2.18)$$

Modified magnetic dip, I' , is expressed in terms of magnetic dip in accordance with equation (2.4).

REFERENCES

- DAVIES, K. [1965] Ionospheric radio propagation. National Bureau of Standards Monograph 80, US Government Printing Office, Washington, DC 20402.
- JENSEN, D. C. and CAIN, J. C. [1962] Interim magnetic field. *J. Geophys. Res.*, **9**, 3568-3569.
- JONES, W. B. and GALLET, R. M. [1960] Ionospheric mapping by numerical methods. *Telecomm. J.*, Vol. 27, **12**, 280-282.
- JONES, W. B. and GALLET, R. M. [1962a] Representation of diurnal and geographic variations of ionospheric data by numerical methods. *Telecomm. J.*, Vol. 29, **5**, 129-147. Also published in *J. Res. NBS-D*, Vol. 66D (Radio Propagation), **4**, 419-438.
- JONES, W. B. and GALLET, R. M. [1962b] Methods for applying numerical maps of ionospheric characteristics. *J. Res. NBS-D*, Vol. 66D (Radio Propagation), **6**, 649-662.
- JONES, W. B. and GALLET, R. M. [1965] The representation of diurnal and geographic variations of ionospheric data by numerical methods, II, control of instability. *Telecomm. J.*, Vol. 32, **1**, 18-28.
- JONES, W. B., GRAHAM, R. P. and LEFTIN, M. [1969] Advances in ionospheric mapping by numerical methods. ESSA Tech. Report ERL 107-ITS 75, US Government Printing Office, Washington, DC 20402.
- JONES, W. B. and OBITTS, D. L. [1970] Global representation of annual and solar cycle variation of foF2 monthly median 1954-1958. Telecommunications Research Report, OT/ITS/RR3, US Government Printing Office, Washington, DC 20402.
- LIU, R. Y., SMITH, P. A. and KING, J. W. [1983] A new solar index which leads to improved foF2 predictions using the CCIR Atlas. *Telecomm. J.*, Vol. 50, **8**, 408-414.

- LOCKWOOD, M. [1983] A simple M-factor algorithm for improved estimation of the basic maximum usable frequency of radio waves reflected from the ionospheric F region. *Proc. IEE*, Vol. 130F, 296-302.
- PIGGOTT, W. R. and RAWER, K. [1972] *URSI Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction* (2nd Ed.). World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics. Report UAG-23, NOAA, Boulder, CO 80303, USA. Spanish text available from LIARA (Argentina) and French text available from CNET (France).
- PIGGOTT, W. R. and RAWER, K. [1978] *URSI Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction* (2nd Ed.). Revision of chapters 1-4. World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics. Report UAG-23A, NOAA, Boulder, CO 80303, USA.
- RAWER, K. [1963] *Meteorological and Astronomical Influences on Radio-wave Propagation*, 221-250. Pergamon Press, New York, NY, USA.

PART 3

PREDICTION OF foE AND E-LAYER BASIC MUF

3.1 Introduction

Two methods are given for determining the regular E-layer basic MUF. The first method, in the form of a series of empirical formulae, is convenient for use in a computer program. The second method is a simple approximation suitable for manual use.

3.2 Empirical prediction of foE and E-layer basic MUF

3.2.1 Prediction of foE

A method for predicting the monthly median foE is given in [Muggleton, 1975] based on all published data over the years 1944-1973 from 55 ionospheric stations:

With foE expressed in MHz

$$(\text{foE})^4 = A B C D \quad (3.1)$$

where A is a solar activity factor, given as:

$$A = 1 + 0.0094 (\Phi - 66) \quad (3.2)$$

Φ : monthly mean 10.7 cm on solar radio-noise flux expressed in units of $10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$. For prediction purposes, it is appropriate to approximate Φ by an estimate of Φ_{12} , the twelve-monthly smoothed value.

B is a seasonal factor, given as:

$$B = \cos^m N \quad (3.3)$$

where:

$N = \lambda - \delta$ for $|\lambda - \delta| < 80^\circ$ and $N = 80^\circ$ for $|\lambda - \delta| \geq 80^\circ$

λ : geographic latitude and is taken as positive in the Northern Hemisphere.

δ : solar declination and is taken as positive for northern declinations.

The exponent m is a function of geographic latitude, λ :

$$m = -1.93 + 1.92 \cos \lambda \quad \text{for } |\lambda| < 32^\circ \quad (3.4a)$$

or:

$$m = 0.11 - 0.49 \cos \lambda \quad \text{for } |\lambda| \geq 32^\circ \quad (3.4b)$$

C is the main latitude factor, given as:

$$C = X + Y \cos \lambda \quad (3.5a)$$

where:

$$X = 23, Y = 116 \quad \text{for } |\lambda| < 32^\circ \quad (3.5b)$$

or:

$$X = 92, Y = 35 \quad \text{for } |\lambda| \geq 32^\circ \quad (3.5c)$$

D is the time-of-day factor.

1st Case: $\chi \leq 73^\circ$

$$D = \cos^p \chi \quad (3.6a)$$

where χ is the solar zenith angle in degrees. For $|\lambda| \leq 12^\circ$, $p = 1.31$; for $|\lambda| > 12^\circ$, $p = 1.20$.

2nd Case: $73^\circ < \chi < 90^\circ$

$$D = \cos^p (\chi - \delta\chi) \quad (3.6b)$$

where:

$$\delta\chi = 6.27 \times 10^{-13} (\chi - 50)^8 \quad \text{degrees} \quad (3.6c)$$

and p is as in the 1st Case.

3rd Case: $\chi \geq 90^\circ$

The night-time value of D , for $\chi \geq 90^\circ$, is taken as the greater of those given by:

$$D = (0.072)^p \exp(-1.4 h) \quad (3.6d)$$

or:

$$D = (0.072)^p \exp(25.2 - 0.28 \chi) \quad (3.6e)$$

where h is the number of hours after sunset ($\chi = 90^\circ$). In polar winter conditions, when the Sun does not rise, equation (3.6e) should be used. p has the same value as in the 1st Case.

The minimum value of foE, based on Wakai [1971] is given by:

$$(\text{foE})_{\text{minimum}}^4 = 0.004 (1 + 0.021 \Phi)^2 \quad (3.7)$$

where Φ may be approximated by an estimated of Φ_{12} , the twelve-monthly smoothed value.

At night, if foE, when calculated by equations (3.1) to (3.6e), is less than that calculated by equation (3.7), the latter value should be taken.

Tests of the accuracy of the prediction method give for a data base of over 80 000 hourly comparisons for the 55 stations a median r.m.s. deviation of 0.11 MHz.

3.2.2 Prediction of E-layer basic MUF

Ionospheric propagation via both single and multiple reflections from the E-layer is important for transmission distances out to 2300 km. At such distances the basic MUF of a particular mode may be determined as the product of the mid-path value of foE and the M factor for a transmission distance set equal to that of a single hop.

Figure 1 gives the M factor based on ray-path calculations for a parabolic model E-layer with $h_mE = 110$ km, $y_mE = 20$ km, when effects of the Earth's magnetic field are neglected. The curve may be approximated by the equation:

$$M \text{ factor} = 3.94 + 2.80x - 1.70x^2 - 0.60x^3 + 0.96x^4 \quad (3.8)$$

where:

$$x = \frac{d - 1150}{1150}$$

and d represents the transmission distance in kilometres.

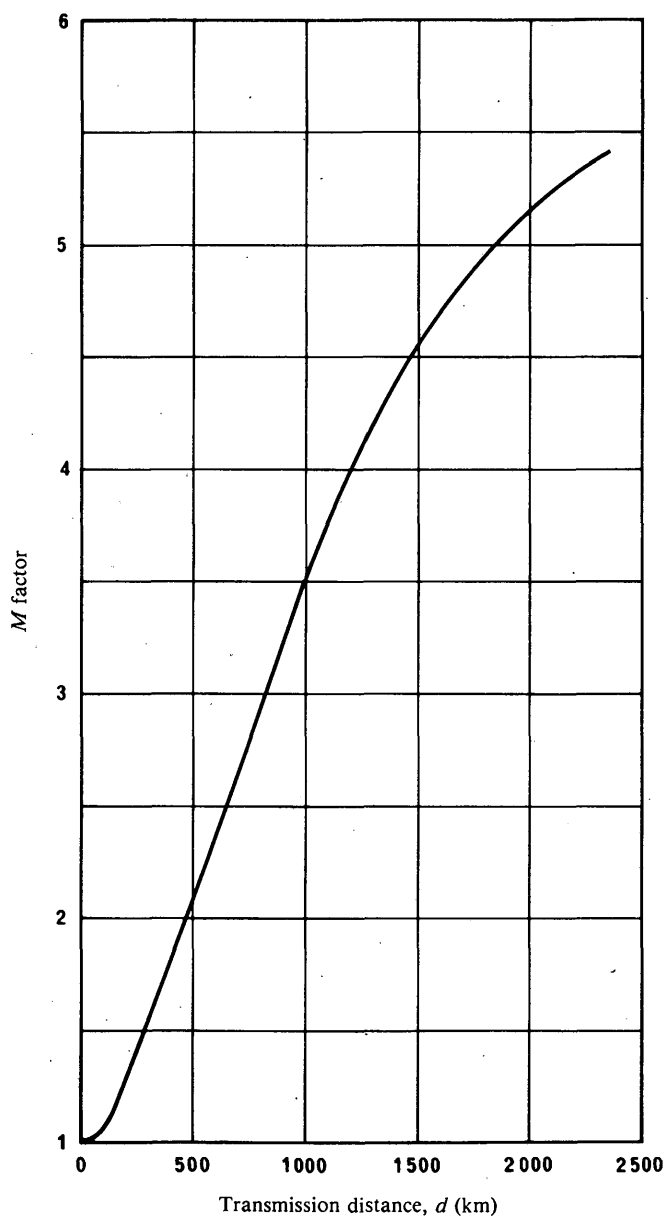


FIGURE 1 – Distance factor curve for the E layer

3.3 Manual prediction of foE and E-layer basic MUF

The approximate method given here, which is suitable for manual use, has been found reasonably satisfactory for daylight hours. Although the method allows the determination of the E-layer basic MUF for all 24 hours, the regular E-layer ionization at night is very low and therefore is usually not an important factor for HF propagation.

An empirical relationship given by Davies [1965] was used to determine foE for $\chi < 80^\circ$ and the mean of foE values from the method of § 3.2.1, for $80^\circ \leq \chi < 116^\circ$. For $\chi \geq 116^\circ$, the limiting night-time value is in accordance with the results of Wakai [1971].

Pages 377 to 388 of Report 340-4 (Geneva, 1983) present charts of the zenith angle of the Sun for each month, to the same scale as the F2-layer charts. However, the contours are plotted on a grid of latitude and local time. Therefore, care must be taken to convert local time to universal time when the regular E-layer basic MUF is to be compared with the F2-layer basic MUF.

The value of zenith angle is read from the solar zenith angle chart for the desired latitude and time. The foE may be determined from the nomogram (Fig. 14) and the regular E-layer basic MUF may be determined from the nomogram given in Fig. 15. The F1-layer basic MUF included in the nomogram was determined by extending the *M* factor curve, Fig. 1, up to distances of 3400 km. A more accurate and precise method for determining the F1-layer basic MUF is given in Part 4.

Part 9 presents a detailed manual method for determining the path basic MUF which incorporates allowances for the E/F1 basic MUF for distances up to 3400 km, together with the F2-layer basic MUF for all distances.

Part 11 presents a corresponding computer version.

REFERENCES

- DAVIES, K. [1965] Ionospheric radio propagation. National Bureau of Standards Monograph 80. US Government Printing Office, Washington, DC 20402.
- MUGGLETON, L. M. [1975] A method of predicting foE at any time and place. *Telecomm. J.*, Vol. 42, 413-418.
- WAKAI, N. [1971] Study on the night-time E region and its effect on the radio wave propagation. *J. Radio Res. Labs. (Japan)*, Vol. 18, 245-348.

PART 4

PREDICTION OF foF1 AND THE F1-LAYER BASIC MUF

4.1 Introduction

A method for predicting the monthly median F1-layer basic MUF is presented in which the F1 layer is considered separately and not as an extension of an E-layer prediction system. The derived expressions for predicting the F1-layer critical frequency were based on data recorded from 1954 to 1966 at 39 ionospheric stations located in both hemispheres [DuCharme *et al.*, 1973]. The staff at ionospheric stations in many countries use standardized methods for reducing ionospheric observations [Piggott and Rawer, 1972 and 1978]. The F1-layer basic MUF for an oblique circuit is determined from a knowledge of the penetration frequency at the midpoint of the path and F1-layer *M* factor for the appropriate great circle distance [Petrie and Stevens, 1965].

4.2 Determination of the F1-layer critical frequency

Several research workers [Scott, 1952; Allen, 1948; Ratcliffe and Weekes, 1960] have reported that the F1-layer critical frequency, foF1, varies with solar zenith angle and its behaviour can usually be represented quite accurately by the equation:

$$\text{foF1} = f_s \cos^n \chi \quad (4.1)$$

where $\chi \leq \chi_m$, the maximum solar zenith angle for which the F1 layer is observed at a given location and the parameters f_s and n [Scott, 1952; Harnischmacher, 1950] are dependent on solar activity and location.

However, on some occasions, the diurnal variation of foF1 at locations near the equator is not dependent on the solar zenith angle during periods of high solar activity [Lange-Hesse, 1959] but is dependent on the variations of the photo-chemical rate coefficients.

The variation of the parameters f_s and n with solar activity has been reported by several workers [Theissen, 1953; Davies, 1965]. An approximately linear relationship was found between the F1-layer characteristics and various ionospheric and solar indices [DuCharme *et al.*, 1973]. The ionospheric index I_{F2} [Minnis, 1955] provided a slightly better representation of these parameters than the 12 month smoothed mean value of the sunspot number, R_{12} . However, the R_{12} index is to be used for the prediction of foF1 because this index is recommended for all ionospheric predictions for dates more than 12 months in advance (Recommendation 371).

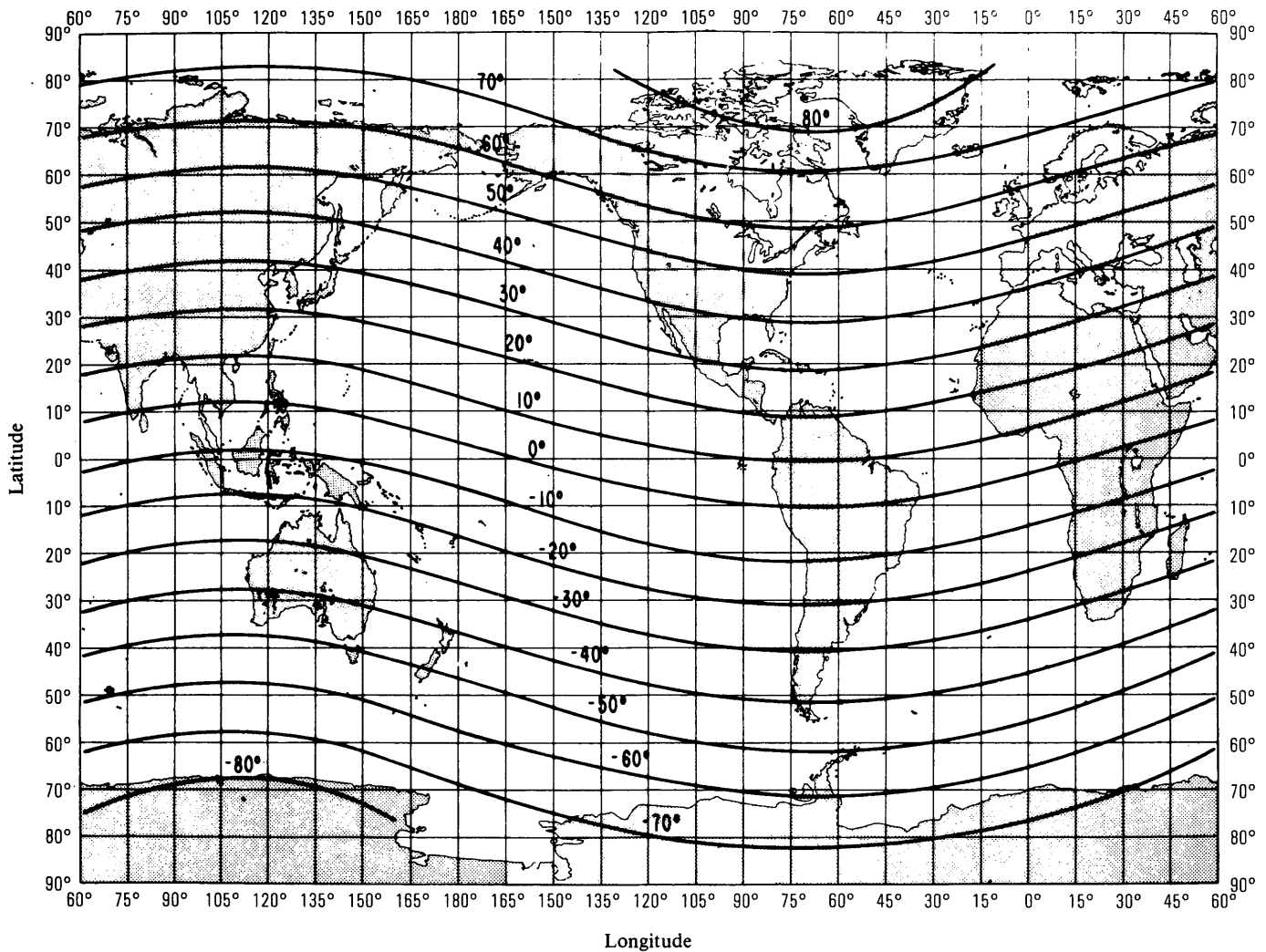


FIGURE 2 - Geomagnetic latitudes

This map was based on the 1965 IGRF (International Geomagnetic Reference Field). For this epoch, the North Geomagnetic Pole is located at 78.8°N, 70.0°W and the South Geomagnetic Pole is located at 78.8°S, 110.0°E.

Extracted from:

CAMPBELL, W.H. [June, 1972] Introduction to solar terrestrial activity for geomagnetic studies, Part II: The Earth's main field.
NOAA Technical Report ERL 244-SEL 23, US Government Printing Office, Washington, DC 20402.

Kervin [1967] reported differences in behaviour of foF1 for North American and European regions, but these differences are reduced considerably if the data are represented as a function of geomagnetic latitude. The geomagnetic latitude coordinate resulted in a better representation of the F1-layer variations than the geographic, magnetic dip, modified magnetic dip, or magnetic invariant latitude coordinates [DuCharme *et al.*, 1973].

Analysis of the reported values of foF1 indicates that this parameter can be determined for any value of R_{12} from the following expressions:

$$\text{foF1} = f_s \cos^n \chi \quad (4.2)$$

where:

$$\begin{aligned} f_s &= f_{s_0} + 0.01 (f_{s_{100}} - f_{s_0}) R_{12} \\ f_{s_0} &= 4.35 + 0.0058 \lambda - 0.000120 \lambda^2 \\ f_{s_{100}} &= 5.35 + 0.0110 \lambda - 0.000230 \lambda^2 \\ n &= 0.093 + 0.00461 \lambda - 0.0000540 \lambda^2 + 0.00031 R_{12} \end{aligned}$$

and where λ represents geomagnetic latitude in degrees.

The maximum solar zenith angle at which the F1 layer is present is given by the following expressions:

$$\chi_m = \chi_0 + 0.01 (\chi_{100} - \chi_0) R_{12} \text{ (degrees)} \quad (4.3)$$

where:

$$\begin{aligned} \chi_0 &= 50.0 + 0.348 \lambda \\ \chi_{100} &= 38.7 + 0.509 \lambda \end{aligned}$$

A world map (Fig. 10) and a great circle chart (Fig. 11) and a map of geomagnetic latitude (Fig. 2) are provided to facilitate determination of path locations, great circle distance and reflection points. From a knowledge of the geomagnetic latitude at the reflection point, the parameters f_s , n and χ_m can be determined for any value of R_{12} using information in Figs. 3, 4 and 5. Using the nomogram in Fig. 6, the value of foF1 can be determined from a knowledge of f_s , n and χ . Charts of the zenith angle of the Sun for each month are presented on pages 377 to 388 of Report 340-4 (Geneva, 1983). The calculation of foF1 is valid only for the condition $\chi \leq \chi_m$.

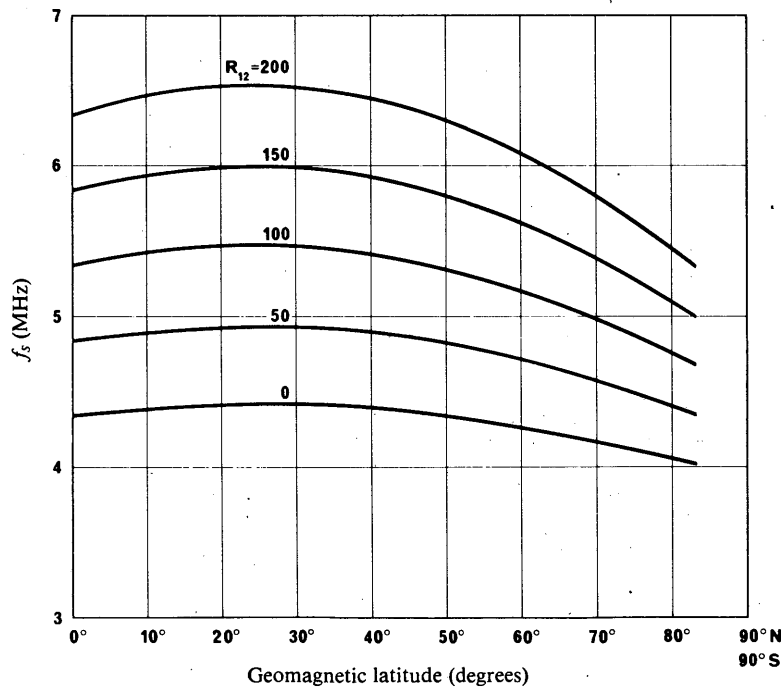


FIGURE 3 - Variation of f_s with geomagnetic latitude and R_{12}

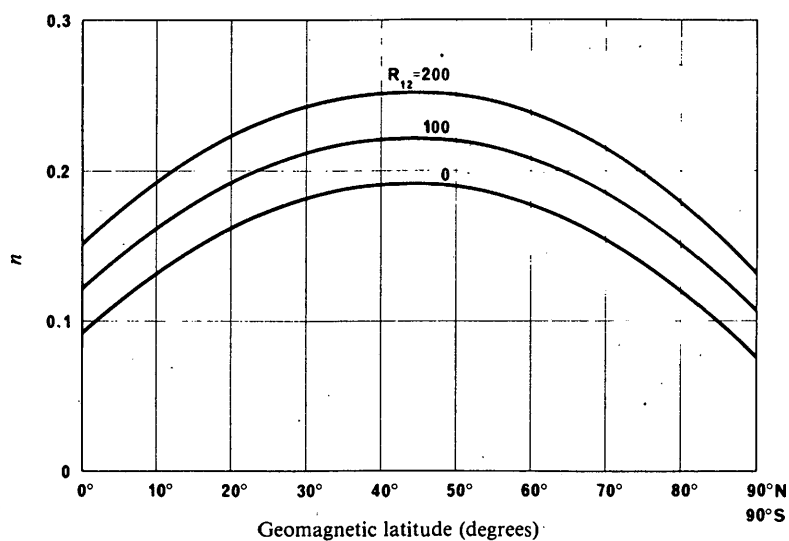


FIGURE 4 – Variation of n with geomagnetic latitude and R_{12}

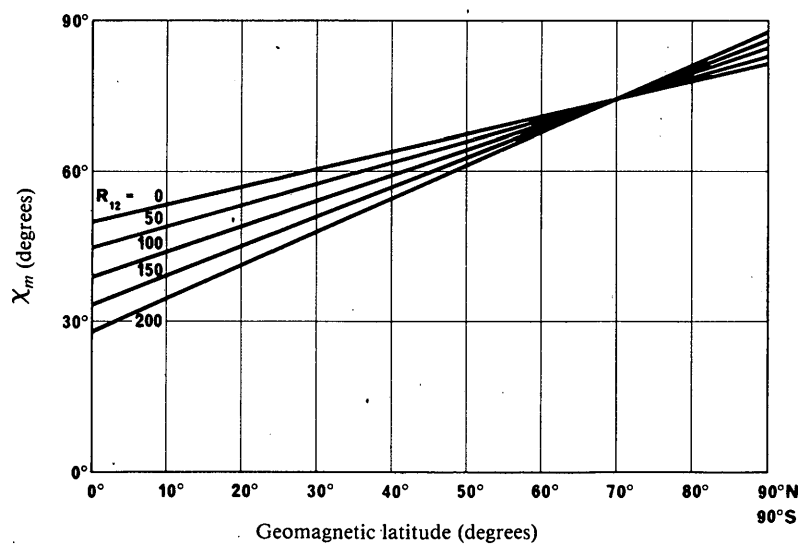


FIGURE 5 – Variation of X_m with geomagnetic latitude and R_{12}

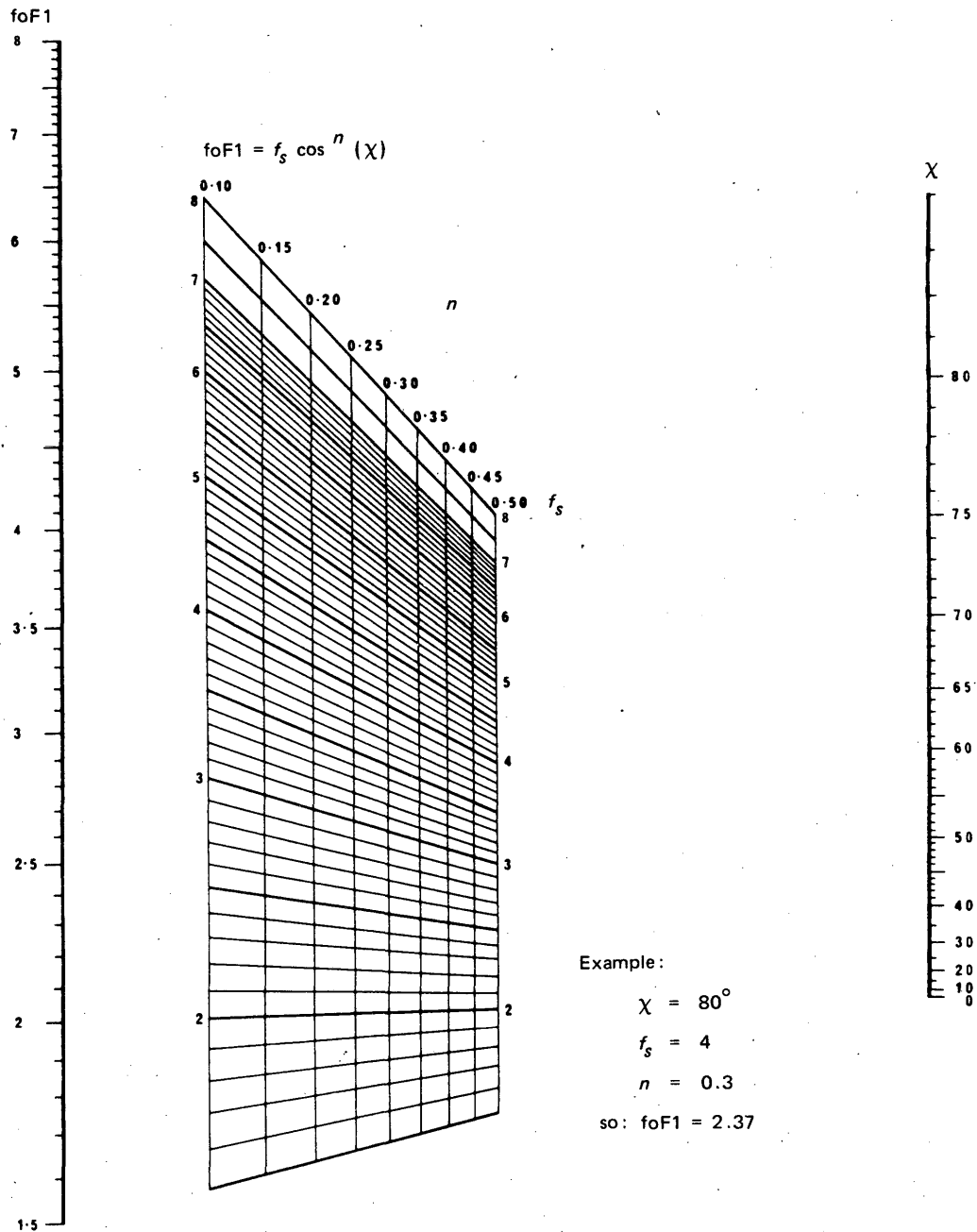


FIGURE 6 - Nomogram for determining the value of foF1

4.3 Determination of F1-layer basic MUF

Ionospheric propagation via the F1 layer is important for transmission distances in the 2000-3400 km range at mid and high latitudes during the summer months. For these transmission distances, F1-layer M factors have been derived [Petrie and Stevens, 1965] for calculating the basic MUF. The factors were derived from ray-tracing calculations on electron density versus height profiles obtained from representative noon ionograms recorded at mid and high latitudes. It is assumed that these factors are applicable for all solar zenith angles. The M factor can be determined from the following numerical expressions for R_{12} between 0 to 150:

$$M \text{ factor} = J_0 - 0.01 (J_0 - J_{100}) R_{12} \quad (4.4)$$

where:

$$J_0 = 0.16 + 2.64 \times 10^{-3} D - 0.40 \times 10^{-6} D^2$$

$$J_{100} = -0.52 + 2.69 \times 10^{-3} D - 0.39 \times 10^{-6} D^2$$

and where D represents the great circle distance in kilometres in the range 2000-3400 km.

For manual computations the M factor can be selected from Fig. 7. The F1-layer basic MUF is computed by multiplying the foF1 by the M factor.

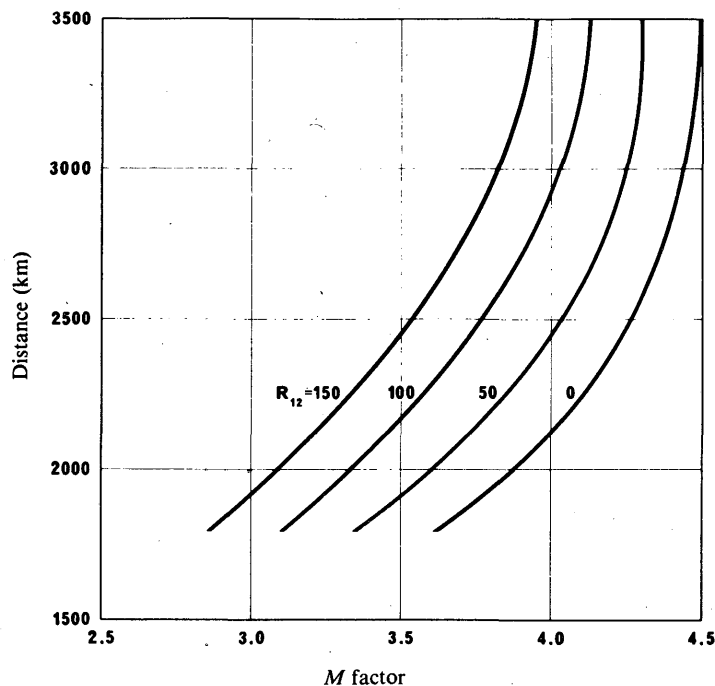


FIGURE 7 – Distance factor curves for the F1 layer

REFERENCES

- ALLEN, C. W. [1948] Critical frequencies, sunspots and sun's ultra violet radiation. *Terr. Magn. Atmos. Elect.*, **53**, 433-448.
- DAVIES, K. [1965] Ionospheric radio propagation. National Bureau of Standards Monograph 80, US Government Printing Office, Washington DC 20402.
- DUCHARME, E. D., PETRIE, L. E. and EYFRIG, R. [1973] A method for predicting the F1 layer critical frequency based on the Zurich smoothed sunspot number. *Radio Sci.*, Vol. 8, 837-839.
- HARNISCHMACHER, E. [1950] L'influence solaire sur la couche E normale de l'ionosphère. *C.R. Acad. Sci. (Paris)*, **230**, 1301.
- KERVIN, C. [1967] Non-Chapman-like behaviour of the F1 layer. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 27, 1299.
- LANGE-HESE, G. [1959] Average diurnal variation of the critical frequencies of the F1 layer and their dependence on the geographic latitude and season. *Z. für Geophysik*, **25**, 199.
- MINNIS, C. M. [1955] A new index of solar activity based on ionospheric measurements. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **7**, 301.
- PETRIE, L. E. and STEVENS, E. E. [1965] An F1 layer MUF prediction system for northern latitudes. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-13, 542.
- PIGGOTT, W. R. and RAWER, K. [1972] *URSI Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction* (2nd Ed.). World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics. Report UAG-23. NOAA, Boulder, CO 80303, USA. Spanish text available from LIARA (Argentina), and French text available from CNET (France).
- PIGGOTT, W. R. and RAWER, K. [1978] *URSI Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction* (2nd Ed.). Revision of chapters 1-4. World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics. Report UAG-23A. NOAA, Boulder, CO 80303, USA.
- RATCLIFFE, J. A. and WEEKES, K. [1960] *Physics of the Upper Atmosphere*. Edited by J. A. Ratcliffe, Chapter 9, Academic Press, New York, NY, USA.
- SCOTT, J. C. W. [1952] The solar control of the E and F1 layers at high latitudes. *J. Geophys. Res.*, Vol. 57, 369.
- THEISSEN, E. [1953] Quelques résultats relatifs à la fréquence critique et au facteur de transmission de la couche ionosphérique F1. *C.R. Acad. Sci. (Paris)*, A237, 1104.

BIBLIOGRAPHY

- PETRIE, L. E. [1968] Developments of HF predictions for the Arctic. Published in *Ionospheric Radio Communications*, 263-271. Plenum Press, New York, NY, USA.

PART 5

NUMERICAL COEFFICIENTS FOR foEs AND fbEs

A set of numerical coefficients defining the diurnal, geographical and seasonal variations of the medians and upper and lower deciles of the foEs for a year of minimum and one of maximum solar activity, and a set of numerical coefficients defining the variations of the medians and upper and lower deciles of the fbEs (blanketing sporadic-E) for a year of minimum solar activity are available from the Director, CCIR.

Sporadic-E observations for 1965, 1967, 1969 and 1971 from 15 temperate-latitude, northern-hemisphere, vertical-incidence sounding stations in Europe, Asia and Japan have been compared with the predicted median and upper decile foEs [Gosnell and Leftin, 1976]. In general, the predicted foEs medians and upper deciles are too high. The average prediction errors for the median foEs are within ± 0.5 MHz but are somewhat greater for the upper deciles. The standard deviation of the median prediction error falls between 0.3 and 0.75 MHz and between 0.6 and 1.8 MHz for the upper decile foEs. The greatest error in the prediction is in the diurnal representation. In the daytime hours, the median foEs prediction error is within $\pm 5\%$, and within $\pm 10\%$ for the upper decile foEs. In the night-time hours, the median foEs prediction error falls within $\pm (10 \text{ to } 35)\%$ and the upper decile foEs prediction error within $\pm (15 \text{ to } 60)\%$.

REFERENCES

- GOSNELL, P. C. and LEFTIN, M. [1976] Analysis of occurrence of sporadic-E and accuracy of predictions of sporadic-E critical frequencies for temperate-latitude northern-hemisphere stations. Office of Telecommunications, Report 76-89, US Department of Commerce, Boulder, CO 80303.

BIBLIOGRAPHY

- LEFTIN, M., OSTROW, S. M. and PRESTON, C. [1968] Numerical maps of foEs for solar cycle minimum and maximum. ESSA Tech. Report ERL 73-ITS 63, US Government Printing Office, Washington, DC 20402.
- LEFTIN, M. and OSTROW, S. M. [1969] Numerical maps of fbEs for solar cycle minimum. ESSA Tech. Report ERL 124-ITS 87, US Government Printing Office, Washington, DC 20402.

PART 6

NUMERICAL COEFFICIENTS FOR THE PERCENTAGE
OF OCCURRENCE OF SPREAD-F

The percentage occurrence of spread-F has been determined from the ionospheric data from the world network of vertical-incidence ionosonde stations for a year representative of high solar activity and for a year of low solar activity [Davis, 1972]. Values have been represented numerically by means of the mapping technique of Jones *et al.* [1969]. Numerical coefficients are available for all months from the Director, CCIR.

REFERENCES

- DAVIS, R. M. [1972] The occurrence of spread-F and its effect on HF propagation. Office of Telecommunications, TRER 28, US Government Printing Office, Washington, DC 20402.
- JONES, W. B., GRAHAM, R. P. and LEFTIN, M. [1969] Advances in ionospheric mapping by numerical methods. ESSA Tech. Report ERL 107-ITS 75, US Government Printing Office, Washington, DC 20402.

PART 7

NUMERICAL COEFFICIENTS FOR h'F AND h'F,F2

Numerical maps have been developed for years of maximum and minimum solar activity of h'F, which is the minimum observed virtual height of reflection of vertical-incidence signals from the F region (generally from the F2 layer at night and from the F1 layer in the daytime). Numerical maps have also been developed for years of maximum and minimum solar activity of h'F,F2, which is the minimum observed virtual height of reflection of vertical-incidence signals from the F2 layer both at night and in the daytime [Leftin *et al.*, 1969]. Both sets of coefficients are available from the Director, CCIR.

REFERENCES

LEFTIN, M., OSTROW, S. M. and PRESTON, C. [1969] Numerical maps of monthly median h'F,F2 for solar cycle minimum and maximum. ESSA Tech. Memo. IERTM-ITSA 69, US Dept. of Commerce, Boulder, CO 80303.

PART 8

MODEL OF VERTICAL DISTRIBUTION OF ELECTRON DENSITY
IN THE E AND F REGIONS

8.1 Introduction

A simple model has been produced of the vertical distribution of electron density in the E and F regions. The model parameters are deduced from empirical equations relating them to the conventionally measured ionospheric characteristics foE, foF2, M(3000)F2 and either h'F or h'F2 as appropriate, whichever is the minimum virtual height of reflection from the F2 layer. Since predicted values of all these characteristics are available, the model may be generated for any place and time. The model is considered as having practical value, both for propagation predictions and for ionospheric morphological investigations.

8.2 Details of the model

The model, produced by Bradley and Dudeney [1973], is given in Fig. 8. It consists of:

- a parabolic E layer below its height of maximum electron density hmE, with semi-thickness ymE. hmE is taken as constant at 110 km and ymE as 20 km;
- a parabolic F2 layer with height of maximum electron density hmF2 and semi-thickness ymF2;
- a linear increase of electron density with height between hmE and the point on the parabolic F2-layer where the plasma frequency f_j is 1.7 foE.

The model parameters hmF2 and ymF2 are given from the empirical equations [Bradley and Dudeney, 1973; Bilitza *et al.*, 1979]:

$$hmF2 = \frac{1490}{M(3000)F2 + \Delta M} - 176 \quad (8.1a)$$

with

$$\Delta M = \frac{0.18}{x - 1.4} + \frac{0.096 (R_{12} - 25)}{150} \quad (8.1b)$$

where $x = \frac{foF2}{foE}$ or 1.7, whichever is the larger

and R_{12} = twelve month smoothed R_i sunspot number.

$$y_m F2 = h_m F2 - h' F, F2 + \Delta h' \quad (8.2a)$$

where:

$$\Delta h' = \left(\frac{0.613}{x - 1.33} \right)^{0.86} \cdot (h_m F2 - 104) \quad (8.2b)$$

$y_m F2$ has a pre-set minimum value of 35 km and a maximum value of $(h_m F2 - h_m E)$.

For the special case when $x = 1.7$ the electron concentration is taken as increasing linearly with height between $h_m E$ and $h_m F2$.

i.e.,

$$y_m F2 = 0 \text{ for } x = 1.7 \quad (8.3)$$

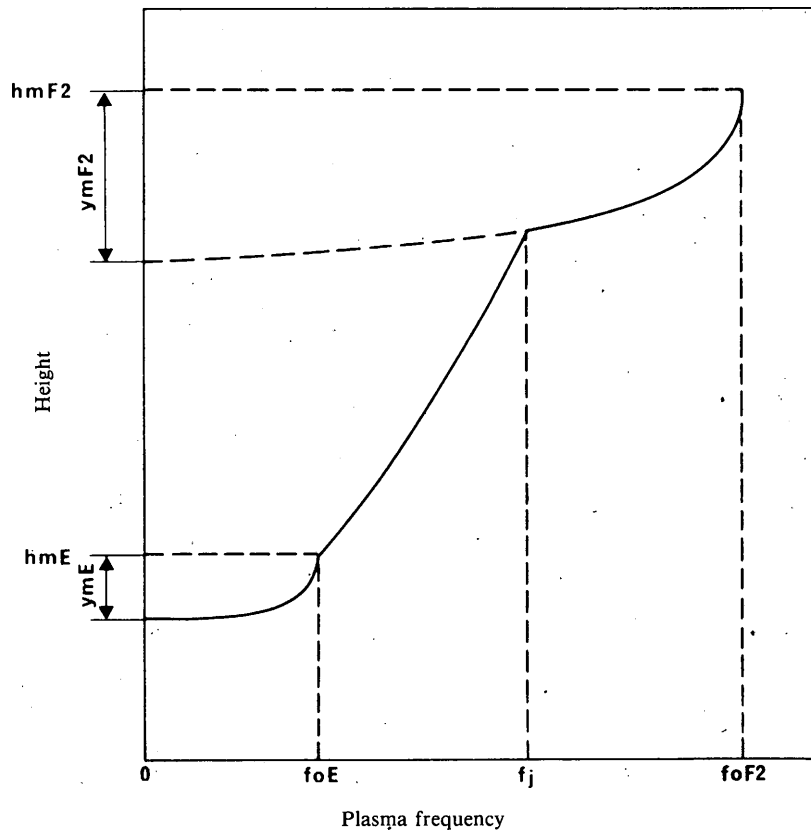


FIGURE 8 – The Bradley-Dudeney model

This consists of:

- a parabolic E layer,
- a linear increase of electron-concentration with height in the F1 region,
- a parabolic F2 layer.

The ordinate scale is taken as being linear in height and the abscissa as linear in frequency.

8.3 Accuracy of the model

Comparisons with true-height analyses of sample ionograms recorded at different locations, times of day, season and solar epoch confirm that the model estimates, based on measured values of vertical-incidence ionospheric characteristics, of the heights corresponding to given electron densities, are usually correct to within 20-30 km.

8.4 Maps of hmF2

Figure 9 gives a sample world map of hmF2 deduced from equation (8.1) and based on the numerical prediction maps of ionospheric characteristics. Maps of ymF2 may be produced in a similar manner using equations (8.1) and (8.2).

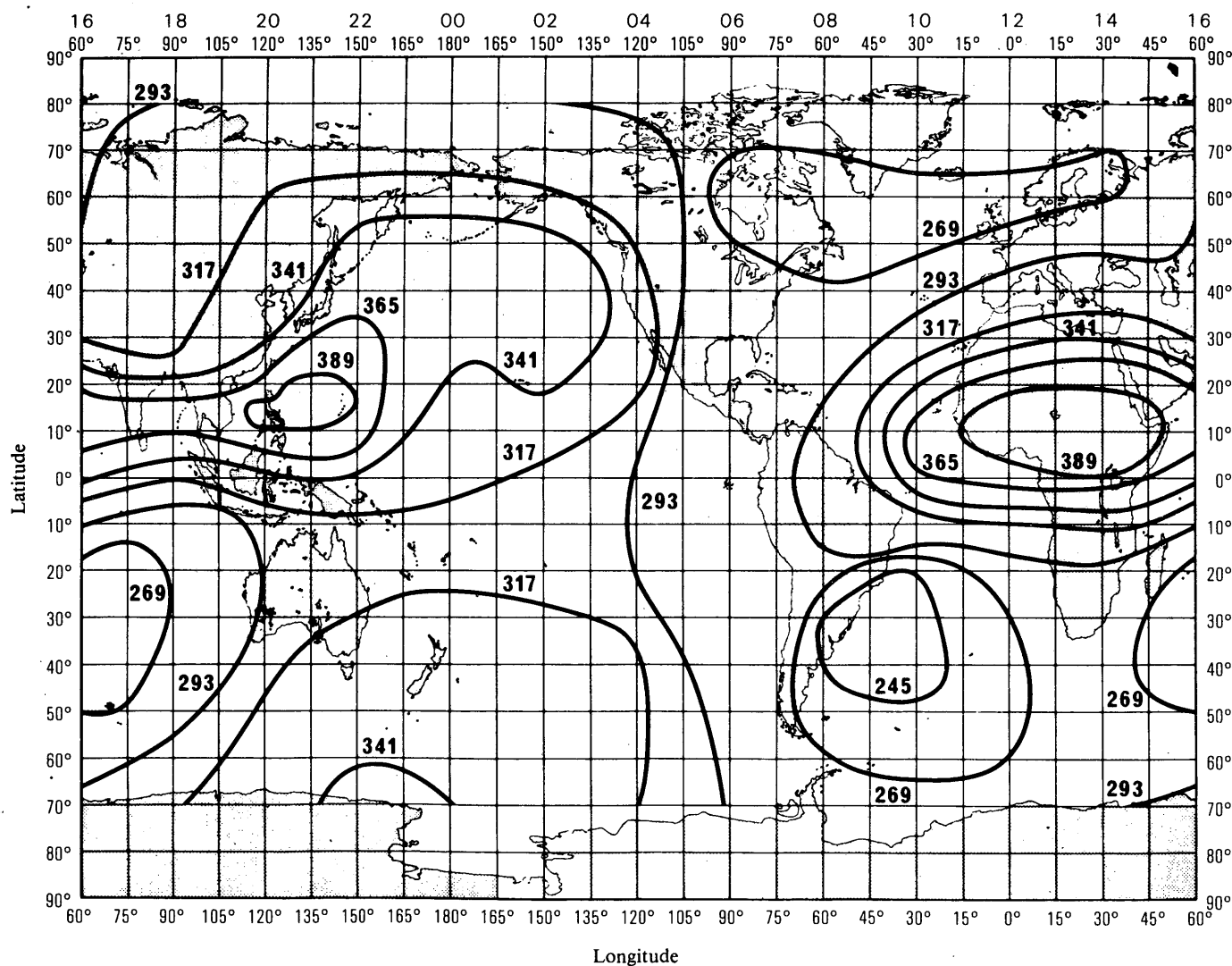


FIGURE 9 – Predicted hmF2 for 1200 h UTC in June with $R_{12} = 100$
(Heights quoted are in kilometres)

8.5 True and virtual heights of reflection at vertical incidence in the model

Analytical expressions exist for the true and virtual heights of reflection, h and h' respectively, for propagation at vertical incidence in this model. For a frequency f given as:

$$f \leq f_oE \quad \text{with} \quad \frac{f}{f_oE} = x_E$$

$$h = h_mE - y_mE \sqrt{1 - x_E^2} \quad (8.4)$$

$$h' = (h_mE - y_mE) + x_E \cdot y_mE \cdot \arctan x_E \quad (8.5)$$

$$f_oE < f \leq f_j \quad \text{with} \quad \frac{f}{f_j} = x_j; x_E \geq 1$$

$$h = h_mE + (h_j - h_mE) \cdot \frac{x_j^2 \cdot (x_E^2 - 1)}{(x_E^2 - x_j^2)} \quad (8.6)$$

$$h' = (h_mE - y_mE) + x_E \cdot y_mE \cdot \operatorname{arccoth} x_E + 2(h_j - h_mE) \cdot \frac{x_j^2 x_E \sqrt{x_E^2 - 1}}{(x_E^2 - x_j^2)} \quad (8.7)$$

$$f_j < f \leq f_oF2 \quad \text{with} \quad \frac{f}{f_oF2} = x_{F2}; x_E > 1; x_j > 1$$

$$h = h_mF2 - y_mF2 \sqrt{1 - x_{F2}^2} \quad (8.8)$$

$$h' = (h_mE - y_mE) + x_E \cdot y_mE \cdot \operatorname{arccoth} x_E + 2(h_j - h_mE) \cdot \frac{x_j \cdot x_E [x_j \sqrt{x_E^2 - 1} - x_E \sqrt{x_j^2 - 1}]}{(x_E^2 - x_j^2)} +$$

$$x_{F2} \cdot y_mF2 \cdot \operatorname{arccosh} \left(\frac{h_mF2 - h_j}{y_mF2 \sqrt{1 - x_{F2}^2}} \right) \quad (8.9)$$

h_j is the height of intersection of the linear and F2 portions of the model corresponding to a plasma frequency f_j . It is given by:

$$h_j = h_mF2 - y_mF2 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_j}{f_oF2} \right)^2} \quad (8.10)$$

REFERENCES

- BILITZA, D., SHEIKH, Noor M. and EYFRIG, R. [1979] A global model for the height of the F2-peak using M3000 values from the CCIR numerical map. *Telecomm. J.*, Vol. 46, IX, 549.
- BRADLEY, P. A. and DUDENEY, J. R. [1973] A simple model of the vertical distribution of electron concentration in the ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 35, 2131-2146.

PART 9

MANUAL METHOD FOR ESTIMATING THE MONTHLY MEDIAN BASIC MAXIMUM USABLE FREQUENCY AND OPTIMUM WORKING FREQUENCY FOR PATHS OF ANY LENGTH

9.1 Introduction

This part outlines step-by-step the procedure for using the world-wide contour charts of F2 basic MUFs in Part 10 to determine the monthly median basic maximum usable frequency (MUF) as defined in Recommendation 373. The method assumes that the ionosphere is concentric with the Earth and propagation is along a great circle.

For transmission paths up to 4000 km, the basic MUF is generally assumed to be associated with a 1 hop mode with the point of reflection at the mid-point of the path. This point is referred to as a "control point". For transmission paths greater than 4000 km, multiple ionospheric reflections are normally required and at least two control points are necessary to estimate the basic MUF. These control points are chosen along the great circle path 2000 km from each end. As it is not feasible to consider the effects of ionospheric tilts, scatter, and the high angle or Pedersen ray in a manual method, this two-control-point method provides a useful approximation for ionospheric effects which tend to increase the operational MUF.

Because of the variability of the F2-layer, the distribution of the basic MUFs around the monthly median can be substantial. Therefore, for operational purposes, the optimum working frequency (FOT) which can be approximated as the value of the basic MUF exceeded 90% of the days of the month, is often used to estimate a practical upper frequency limit for communication circuits.

The world maps of F2(ZERO)MUF and F2(4000)MUF, pages 86 to 373 of Report 340-4 (Geneva, 1983) as derived from the Oslo coefficients, are used for determination of the F2-layer basic MUF. The nomograms (Figs. 14 and 15) are used for determining the E/F1 basic MUF (see Part 3). The smoothed sunspot number R_{12} should be used in all computations requiring a solar index. In the case of the F2 layer only, the F2(ZERO)MUF and F2(4000)MUF should not be extrapolated to values of R_{12} greater than 150. For these values of R_{12} , the F2 basic MUF does not increase significantly with an increase in the smoothed sunspot number.

The great circle distance (GCD) is established in § 9.2. For transmission paths less than 4000 km, § 9.3 applies, and for longer paths, the procedures of § 9.4 should be followed. Examples are included to illustrate each case.

9.2 Path length determination

Using the world map (Fig. 10) and great-circle chart (Fig. 11), determine the path length as follows:

- place a sheet of transparent paper over the world map (Fig. 10) and draw the equator line and the Greenwich meridian line;
- mark the transmitter and receiver locations;
- transfer the transparency to the great-circle chart (Fig. 11). Superpose the equators and slide the transparency horizontally until the two locations are on the same great circle, i.e., both on the same solid line or proportionally distant between adjacent solid lines. Draw the great-circle path along this line;
- using the dash-dot lines (1000 km apart) and the intermediate dotted lines (500 km separation) estimate the great-circle distance, D;
- if D is less than 4000 km, continue with § 9.3. Otherwise, go to § 9.4.

9.3 Transmission paths less than 4000 km

The basic MUF for a transmission path equal to or less than 3400 km is the greater of the basic MUF for the E/F1 mode and for the F2 mode. For paths between 3400 and 4000 km, determine the F2 mode only. The circuit FOT is the larger of the F2 or E/F1 FOTs. In certain circumstances, the FOT may not be for the same mode as the basic MUF. As the day-to-day variations of the E/F1 basic MUF are negligible, for long range planning purposes, the FOT for these layers can be simplified by assuming the FOT is equal to the basic MUF. Similarly, for the F2 layer, the FOT computation may be simplified by multiplying the monthly median basic MUF by 0.85.

The steps for a manual calculation of the basic MUF and FOT are as indicated below: (A suggested data tabulation is presented in Table II. The example shown is for the Moscow (USSR) to Luechow (Federal Republic of Germany) path (GCD = 1710 km).)

- (a) Mark the mid-path position on the transparency, using the world map (Fig. 10), record the latitude and longitude (55.1° N, 23.8° E for the example).
- (b) Turn to the charts labelled F2(ZERO)MUF and F2(4000)MUF for $R_{12} = 0$ and 100 (i.e., for July, pages 230 to 253 of Report 340-4 (Geneva, 1983)). Place the transparency over the four charts for each UTC hour in Column (1), superposing the equators and the Greenwich meridians. Read the frequency at the mid-path position on the transparency. Tabulate these MUF values in Columns (2), (3), (5) and (6) as appropriate.
- (c) Calculate F2(ZERO)MUF and F2(4000)MUF for the required smoothed sunspot number, R_{12} , by using the following linear relationship to interpolate/extrapolate the tabulated values. Limit R_{12} to a maximum value of 150.

$$\text{MUF} = \text{MUF}_0 + 0.01 R_{12}(\text{MUF}_{100} - \text{MUF}_0). \quad (9.1)$$

Tabulate the values in Columns (4) and (7), as appropriate. Interpolation may also be made by using linear graph paper.

- (d) Enter the nomogram (Fig. 12) with the MUF for R_{12} , from step (c), Columns (4) and (7), and for the great-circle distance, D, read the value of F2(D)MUF from either the F2(ZERO)MUF or F2(4000)MUF scale. Tabulate in Column (8).
- (e) Calculate the F2 FOT by multiplying the MUF, Column (8), by the factor 0.85 or by using the conversion scale given in Fig. 13. Tabulate the F2(D)FOT in Column (9).
- (f) Select the chart of the solar zenith angle for the required month e.g. July on page 383 of Report 340-4 (Geneva, 1983). Place the transparency over the chart so that the equators are superposed. Place the Greenwich meridian line on the 00 local time of the zenith angle chart and at the mid-point position, read the Sun's zenith angle at 0000 UTC. Repeat this step for each UTC hour and tabulate the solar zenith angle, χ , in Column (10).
- (g) Enter the nomogram (Fig. 14) with χ and R_{12} . Read the foE for each UTC hour. Tabulate in Column (11).
- (h) Convert the results of step (g) to the E/F1(D)MUF for the great-circle distance, D, using the nomogram in Fig. 15. Tabulate in Column (12). This nomogram includes a factor for F1 propagation between 2000 and 3400 km.
- (j) The basic MUF for the transmission path is the larger of the (D)MUF values, Columns (8) and (12). Tabulate in Column (13).
- (k) The path FOT is the larger of the F2 FOT values in Column (9) and the E/F1 MUF values in Column (12). Insert in Column (14).

Note. — It is assumed that the E/F1 FOT is equal to the E/F1 basic MUF.

9.4 Transmission paths greater than 4000 km

The transmission path basic MUF is determined by the two-control-point procedure. Only the F2 mode of propagation is considered as the likelihood of an E mode controlling the MUF on long paths is so small that for long range planning purposes, the consideration of the F2 mode alone is adequate. For the calculation of the FOT, the F2 MUF is multiplied by a constant factor, given as 0.85. For long range planning purposes, this FOT value is considered adequate. The steps for a manual calculation of the basic MUF and FOT are as indicated below: (A suggested data tabulation is presented in Table III for the Kauai (Hawaii) to Hiraiso (Japan) path (GCD = 5910 km).)

- (a) Using the great-circle chart (Fig. 11), mark the location of the F2-layer control points, A and B, 2000 km from each terminal. Determine the latitude and longitude for each control point using the world map (Fig. 10) and record.

- (b) Turn to the charts of F2(4000)MUF for $R_{12} = 0$ and 100 (i.e., for January pages 86 to 109 of Report 340-4 (Geneva, 1983)). Place the transparency over the lower charts on the proper page for each UTC hour in Column (1), superposing the equators and Greenwich meridians. Read the frequencies at the two F2-layer control points in Column (2). Tabulate these MUF values in Columns (3) and (4), as appropriate.
- (c) Calculate F2(4000)MUF for the required smoothed sunspot number, R_{12} , by using the following linear relationship to interpolate/extrapolate the tabulated values. Limit R_{12} to a maximum value of 150.

$$\text{MUF} = \text{MUF}_0 + 0.01 R_{12} (\text{MUF}_{100} - \text{MUF}_0). \quad (9.2)$$

Tabulate the values in Column (5). Interpolation may also be made by using linear graph paper.

- (d) The basic MUF for the transmission path is the smaller of the MUFs for the two control points, A and B. Tabulate the path basic MUF in Column (6).
- (e) Calculate the path FOT by multiplying the path basic MUF, Column (6), by the factor 0.85 or by using the conversion scale given in Fig. 13. Tabulate the path FOT in Column (7).

TABLE II — Sample manual estimation of the basic MUF and FOT for a path length less than 4000 km

July

$R_{12} = 40$

Great-circle distance = 1710 km

Moscow (USSR): 55.8° N-37.3° E
to Luechow (Fed. Rep. of Germany): 53.0° N-11.2° E

Path mid-point: 55.1° N-23.8° E

UTC (1)	F2(ZERO)MUF			F2(4000)MUF			F2 (D) MUF	F2 (D) FOT	Zenith angle (degrees)	foE	E/F1 (D) MUF	Path MUF	Path FOT
	$R_{12} = 0$ (2)	$R_{12} = 100$ (3)	$R_{12} = 40$ (4)	$R_{12} = 0$ (5)	$R_{12} = 100$ (6)	$R_{12} = 40$ (7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
0000	3.7	5.9	4.6	10.3	16.2	12.7	8.4	7.1	101	0.95	4.7	8.4	7.1
0200	3.6	5.6	4.4	10.0	15.5	12.2	8.1	6.9	92	1.43	7.0	8.1	7.0
0400	4.4	6.1	5.1	13.0	17.0	14.6	9.6	8.2	77	2.44	12.0	12.0	12.0
0600	5.0	7.0	5.8	15.0	19.7	16.9	11.1	9.4	61	2.95	14.5	14.5	14.5
0800	5.3	7.2	6.1	15.8	20.3	17.6	11.6	9.9	45	3.24	15.9	15.9	15.9
1000	5.4	7.5	6.2	16.2	21.0	18.1	11.9	10.1	35	3.37	16.3	16.3	16.3
1200	5.1	7.2	5.9	15.5	20.5	17.5	11.5	9.8	39	3.32	16.0	16.0	16.0
1400	5.0	7.0	5.8	14.8	19.8	16.8	11.1	9.4	62	2.92	14.3	14.3	14.3
1600	5.0	7.0	5.8	15.5	20.6	17.5	11.5	9.8	69	2.73	13.3	13.3	13.3
1800	5.3	7.3	6.1	17.0	22.0	19.0	12.3	10.5	85	2.00	9.8	12.3	10.5
2000	5.4	7.3	6.2	17.0	21.5	18.8	12.2	10.4	96	1.19	5.8	12.2	10.4
2200	4.3	6.5	5.2	13.0	18.5	15.2	10.0	8.5	102	0.91	4.5	10.0	8.5

TABLE III — Sample manual estimation of the basic MUF and FOT for a path length greater than 4000 km

January

 $R_{12} = 125$

Great-circle distance = 5910 km

Kauai (Hawaii): 22.0° N-159.8° W

to Hiraio (Japan): 36.4° N-140.6° E

Control points: A: 30° N-178° W

B: 35° N-163° E

UTC (1)	Control point (2)	F2(4000)MUF			Path MUF (6)	Path FOT (7)
		$R_{12} = 0$ (3)	$R_{12} = 100$ (4)	$R_{12} = 125$ (5)		
0000	A	27.5	36.5	38.8	37.9	32.2
	B	25.0	35.3	37.9		
0200	A	26.5	36.0	38.4	36.5	31.0
	B	25.5	34.3	36.5		
0400	A	22.0	33.8	36.8	35.5	30.2
	B	23.0	33.0	35.5		
0600	A	16.0	25.8	28.3	28.3	24.1
	B	18.2	29.8	32.7		
0800	A	11.8	20.5	22.7	22.7	19.3
	B	12.0	22.0	24.5		
1000	A	10.6	15.6	16.9	16.9	14.4
	B	10.9	16.0	17.3		
1200	A	11.5	13.5	14.0	12.6	10.7
	B	10.6	12.2	12.6		
1400	A	11.8	12.2	12.3	12.1	10.3
	B	10.7	11.8	12.1		
1600	A	9.2	9.9	10.1	10.1	8.6
	B	10.5	11.7	12.0		
1800	A	10.2	13.5	14.3	9.6	8.2
	B	9.0	9.5	9.6		
2000	A	21.0	33.0	36.0	17.8	15.1
	B	13.8	17.0	17.8		
2200	A	26.0	38.0	41.0	34.8	29.6
	B	21.0	32.0	34.8		

PART 10

CHARTS FOR ESTIMATING F2(ZERO)MUF, F2(4000)MUF AND ZENITH ANGLE OF THE SUN

The charts of F2(ZERO)MUF, F2(4000)MUF and zenith angle of the Sun are presented in the Annex to Report 340-4 (Geneva, 1983) at the following pages.

Charts of F2(ZERO)MUF and F2(4000)MUF

Month	Universal time (h)											
	0000	0200	0400	0600	0800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200
	The pages indicated below correspond to $R_{12} = 0$; for $R_{12} = 100$, add 1 to the number indicated.											
January	86	88	90	92	94	96	98	100	102	104	106	108
February	110	112	114	116	118	120	122	124	126	128	130	132
March	134	136	138	140	142	144	146	148	150	152	154	156
April	158	160	162	164	166	168	170	172	174	176	178	180
May	182	184	186	188	190	192	194	196	198	200	202	204
June	206	208	210	212	214	216	218	220	222	224	226	228
July	230	232	234	236	238	240	242	244	246	248	250	252
August	254	256	258	260	262	264	266	268	270	272	274	276
September	278	280	282	284	286	288	290	292	294	296	298	300
October	302	304	306	308	310	312	314	316	318	320	322	324
November	326	328	330	332	334	336	338	340	342	344	346	348
December	350	352	354	356	358	360	362	364	366	368	370	372

	Page
Zenith angle of the Sun, January - February	377-378
March - April	379-380
May - June	381-382
July - August	383-384
September - October	385-386
November - December	387-388

PART 11

COMPUTER METHOD FOR ESTIMATING THE MONTHLY MEDIAN BASIC MUF AND OPTIMUM WORKING FREQUENCY

11.1 Introduction

The monthly median basic MUF and the optimum working frequency (FOT) are each estimated as the greatest of the basic MUF and FOT values for the propagation modes appropriate to the path length being considered. The modes considered are:

1F2	0-4000 km
higher order F2 modes	beyond 4000 km
1F1	2000-3400 km
1E	0-2000 km
2E	2000-4000 km

11.2 F2 mapping

Two sets of coefficients are available; a 3-dimensional set with a linear solar cycle dependence and coefficients for each calendar month (the Oslo 1966 coefficients); and a 5-dimensional set with a quadratic solar cycle dependence with which monthly median predictions may be centred on any day of the year (the New Delhi 1970 coefficients). The Oslo 1966 coefficients are preferred for use in evaluating the basic MUF.

The mapping is expressed as a function of a latitude parameter which depends on the Earth's magnetic field. The electron gyro frequency f_H proportional to the strength of the field is also required to be evaluated. Use is made of a numerical field model for epoch 1960.

11.3 F2 prediction procedures

11.3.1 0-4000 km paths

The zero distance basic MUF is obtained by:

$$F2(ZERO)MUF = foF2 + f_H/2 \quad (11.1)$$

and the 4000 km MUF by

$$F2(4000)MUF = 1.1 \times foF2 \times M(3000)F2 \quad (11.2)$$

Predictions for ranges between 0 and 4000 km are obtained by interpolating between $F2(ZERO)MUF$ and $F2(4000)MUF$ using a distance ratio obtained from Fig. 12. Ionospheric characteristics for the mid-point of the great-circle path are used.

11.3.2 Paths longer than 4000 km

Values of $F2(4000)MUF$ are determined for two control-point locations at 2000 km from each terminal along the connecting great-circle path. The path MUF is the lower of the two values.

11.3.3 Solar cycle dependence

When using the Oslo 1966 coefficients, the procedure of § 2.4.2 is undertaken for sunspot numbers of 0 and 100. The basic MUF for the required sunspot number, R_{12} , is obtained by linear interpolation/extrapolation for values between 0 and 150. When R_{12} exceeds 150, the value of 150 should be used.

11.4 F1 prediction procedure

The method for predicting the F1-layer basic MUF for ranges between 2000 and 3400 km is given in Part 4. The geomagnetic latitude and solar zenith angle are determined for the mid-point of the great-circle path.

11.5 E prediction procedure

The method for predicting the E-layer basic MUF for ranges between 0 and 2000 km is given in Part 3. The latitude and solar zenith angle for the mid-point of the great-circle path are used.

The 2E MUF, for ranges between 2000 and 4000 km, is taken as $E(2000)MUF$ expressed in terms of the mid-path foE .

11.6 Optimum working frequency predictions

The FOT for each mode is estimated in terms of the corresponding basic MUF using the conversion factor F_oF_1 set equal to 0.95 for E and F1 modes and as given from Table I of the Supplement to Report 252 for F2 modes. The quoted FOT is the greatest of those for the separate modes and may not on occasion apply to the same mode as that for which the MUF is tabulated.

11.7 Computer program

The computer program MUFFY contains the procedures outlined above and is available from the Director, CCIR. Input data include the locations of the transmitter and receiver. The program calculates the great-circle path. A sample print-out is given in Table IV. As indicated in Resolution 63, Data Tapes 1 or 3 are required for the Oslo coefficients or Data Tape 2 if the New Delhi coefficients are to be used.

TABLE IV — Example of computer estimation of the basic MUF and FOT

PROGRAM 'MUFFY' VERSION-JAN 82
BASIC MUF AND FOT DETERMINATION IN ACCORDANCE WITH CCIR REPORT 340-4
OSLO FOF2 COEFFICIENTS

MARCH 1979			SUNSPOT NO. 125.0					
SYDNEY			TO ADELAIDE			AZIMUTHS		
33.92S	151.17E		34.92S	138.58E		260.95	88.09	
						MILES	KM	
						720.5	1159.4	
SHORT PATH								
UT	MUF	FOT	UT	MUF	FOT	UT	MUF	FOT
01	15.7	13.9	07	15.1	13.1	13	10.4	8.4
02	15.9	14.2	08	14.7	12.8	14	10.1	8.2
03	15.8	14.2	09	13.8	11.9	15	9.7	7.9
04	15.5	13.9	10	12.5	10.8	16	9.3	7.5
05	15.4	13.4	11	11.3	9.7	17	8.8	7.2
06	15.2	13.3	12	10.6	9.1	18	8.1	6.7
						19	7.8	6.4
						20	8.7	7.2
						21	10.9	9.5
						22	13.2	11.5
						23	14.7	12.8
						24	15.3	13.3

PART 12

MIRROR-REFLECTION HEIGHT

For the simplified estimation of oblique ray paths, reflection may be assumed to take place from an effective plane mirror located at height h_T , given from Lockwood [1984] as:

$$h_T = 358 - (11 - 100a) \left(18.8 - \frac{320}{x^5} \right) + aD \left(0.03 + \frac{14}{x^4} \right) \quad \text{km} \quad (12.1)$$

or 500 km, whichever is the smaller, where:

$$a = \frac{1}{M(3000)F2} - 0.24, \text{ or } 0.04, \text{ whichever is the larger;}$$

$$x = \frac{foF2}{foE} \text{ or } 2, \text{ whichever is the greater;}$$

D : ground range (km).

For ratios of wave frequency to basic MUF in the range 0.80-0.95 and for heights of hmF2 between $250 < \text{hmF2} < 500$ km and with $x > 2$, equation (12.1) is accurate to within 10%. The equation may be used with lower frequencies and lower x with reduced accuracy.

Simplified equations appropriate to night (solar-zenith angle $\chi \geq 90^\circ$) and day ($\chi < 90^\circ$) conditions, derived from values given by equation (12.1), are:

$$\text{Night: } h_T = \frac{1880}{M(3000)F_2} - 300 \quad \text{km} \quad (12.2)$$

$$\text{Day: } h_T = 160 + (0.143D + 1800) \left\{ \frac{1}{M(3000)F_2} - 0.24 \right\} \quad \text{km} \quad (12.3)$$

Use of the appropriate equation for $x > 3$ gives errors of less than 5% in h_T .

REFERENCES

LOCKWOOD, M. [1984] Simplified estimation of raypath mirroring height for HF radiowaves reflected from the ionospheric F region. *Proc. IEE*, Vol. 131, Part F, 2, 117.

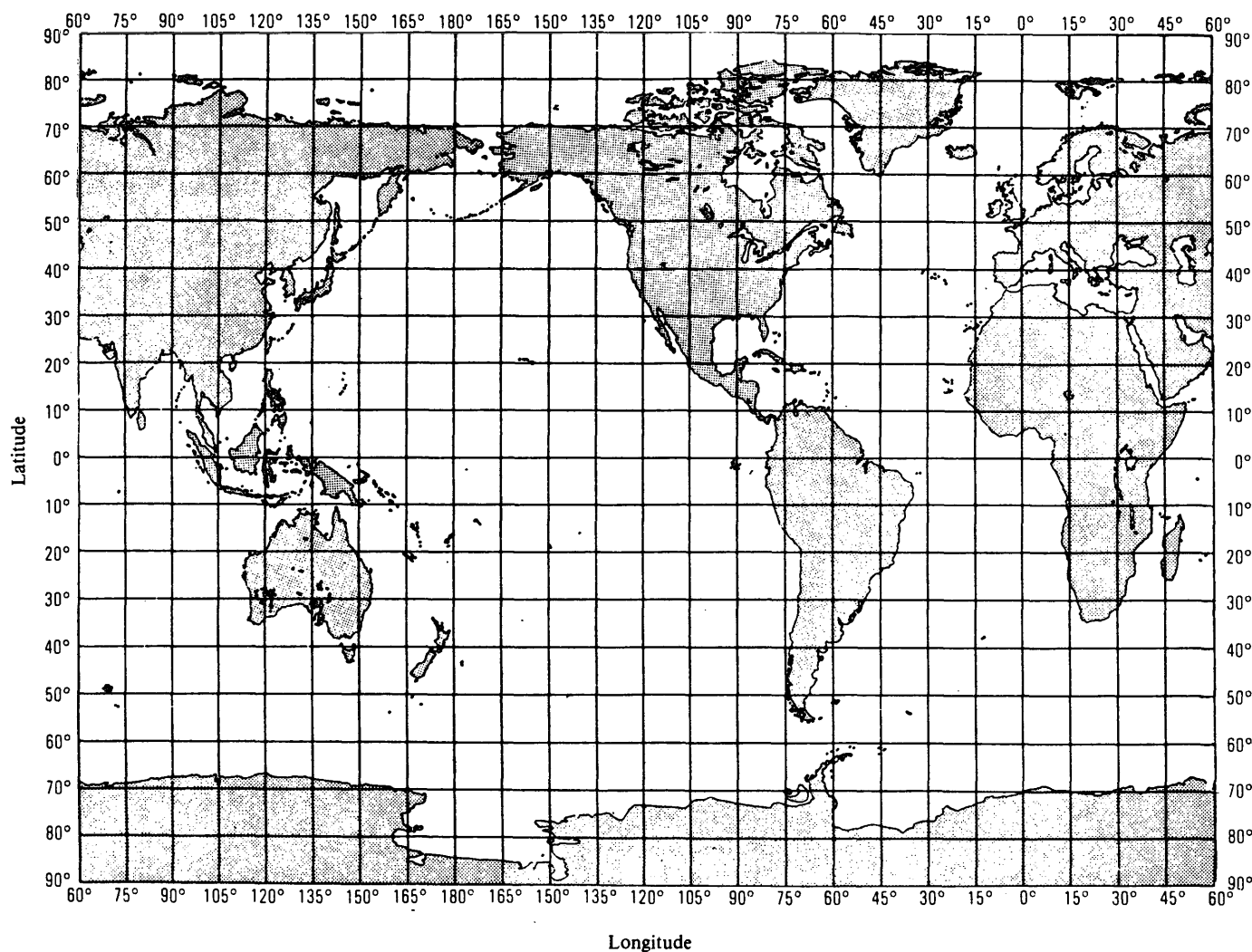


FIGURE 10 — World map, on a modified cylindrical projection

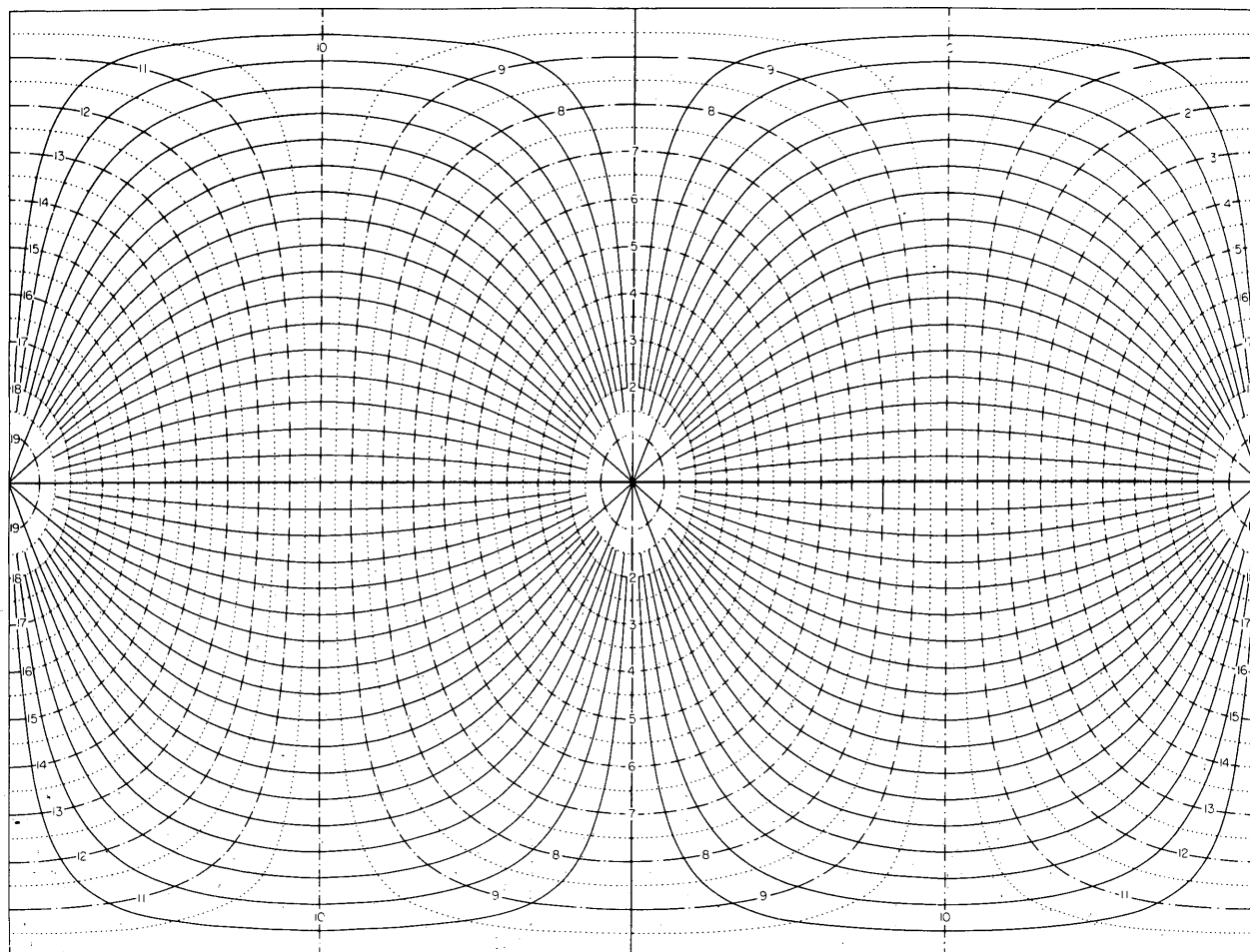


FIGURE 11 — *Great-circle chart centred on the equator for use with the world map on a modified cylindrical projection*
(Solid lines represent great circles, numbered chain-dotted lines indicate distance in thousands of kilometres)

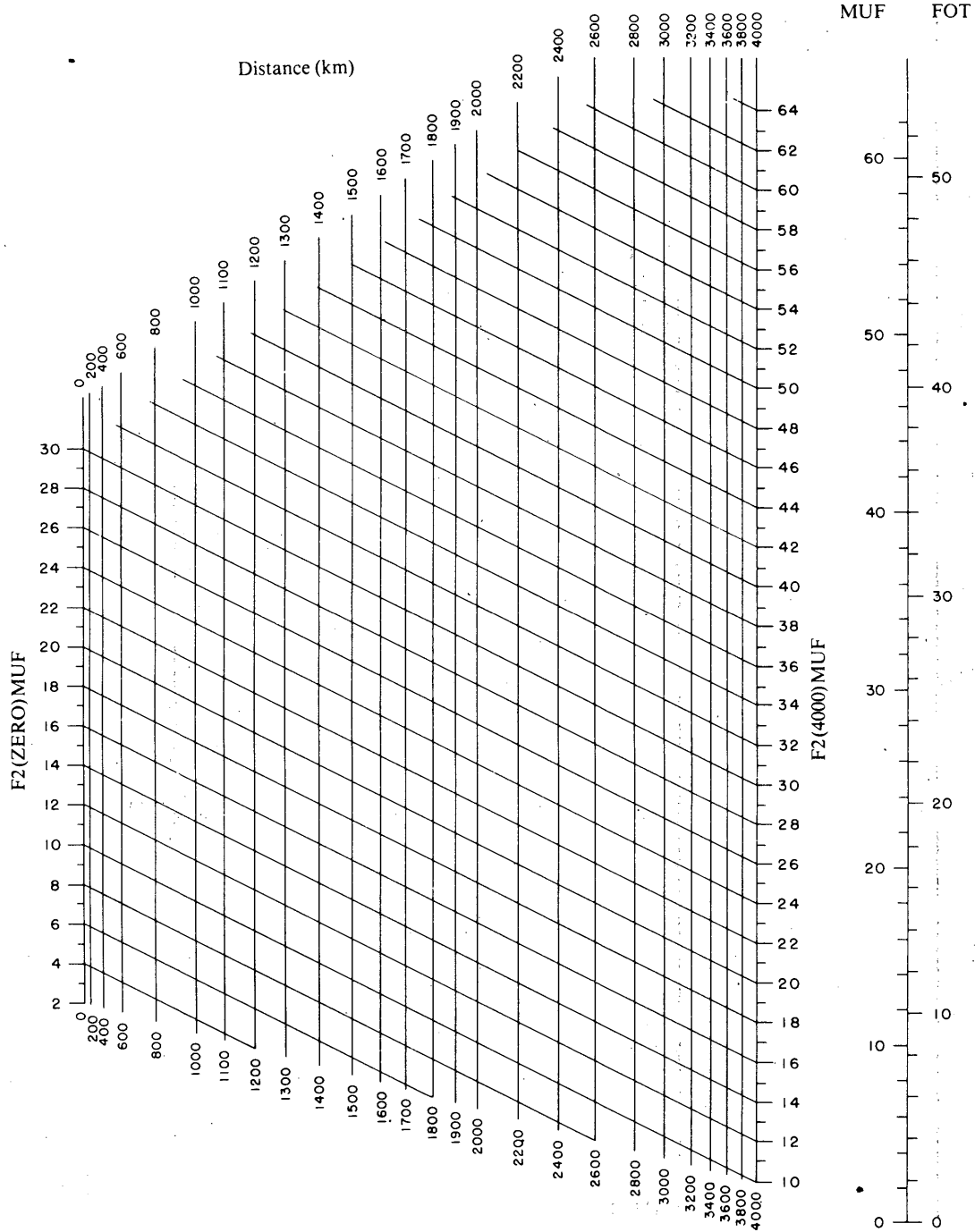


FIGURE 12 — Nomogram for transforming $F_2(\text{ZERO})\text{MUF}$ and $F_2(4000)\text{MUF}$ to equivalent basic maximum usable frequencies at intermediate transmission distances

FIGURE 13
Conversion scale for
obtaining optimum
working frequency
(FOT)

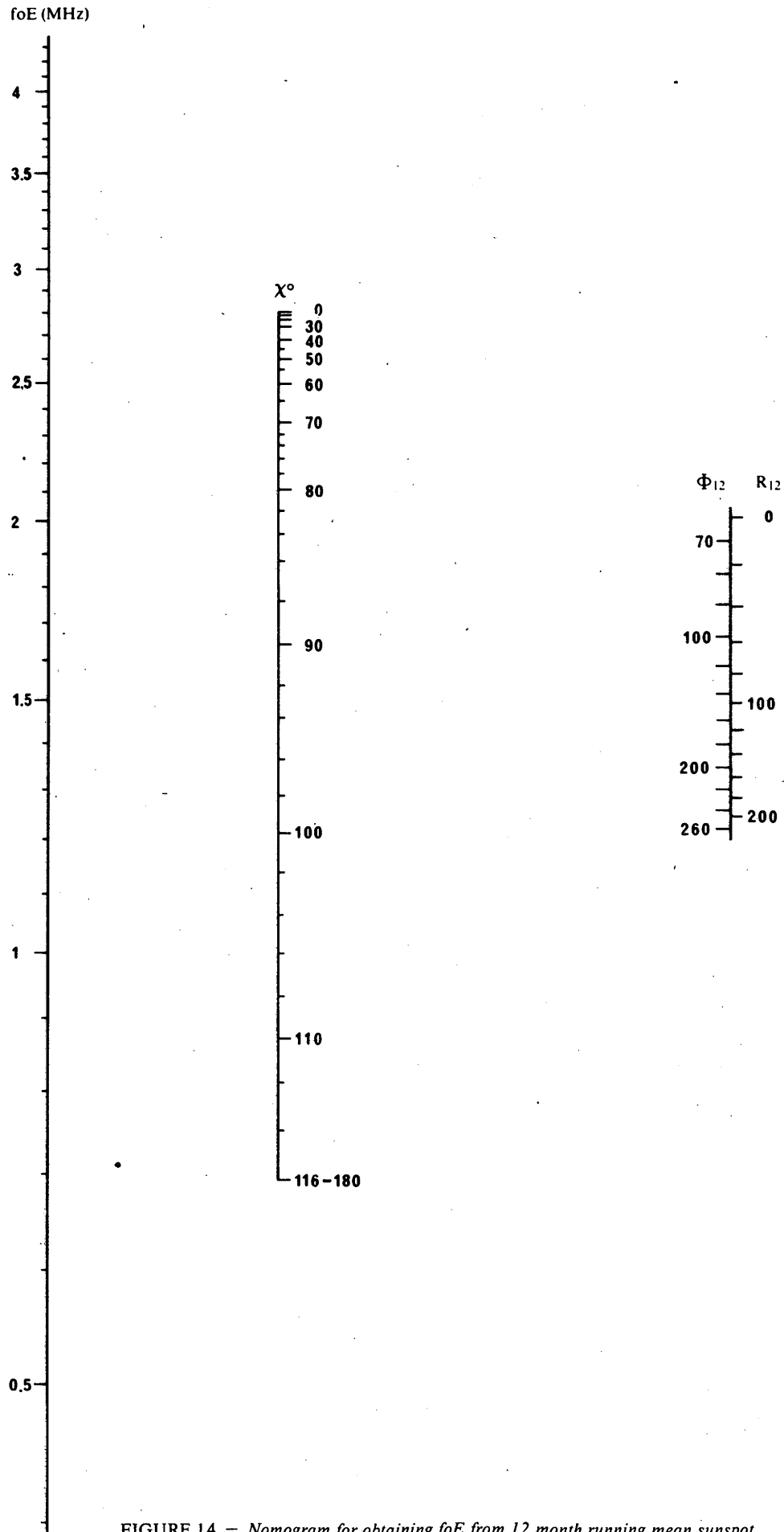


FIGURE 14 — Nomogram for obtaining foE from 12 month running mean sunspot number, R_{12} , or solar radio flux, Φ_{12} , and the solar-zenith angle χ

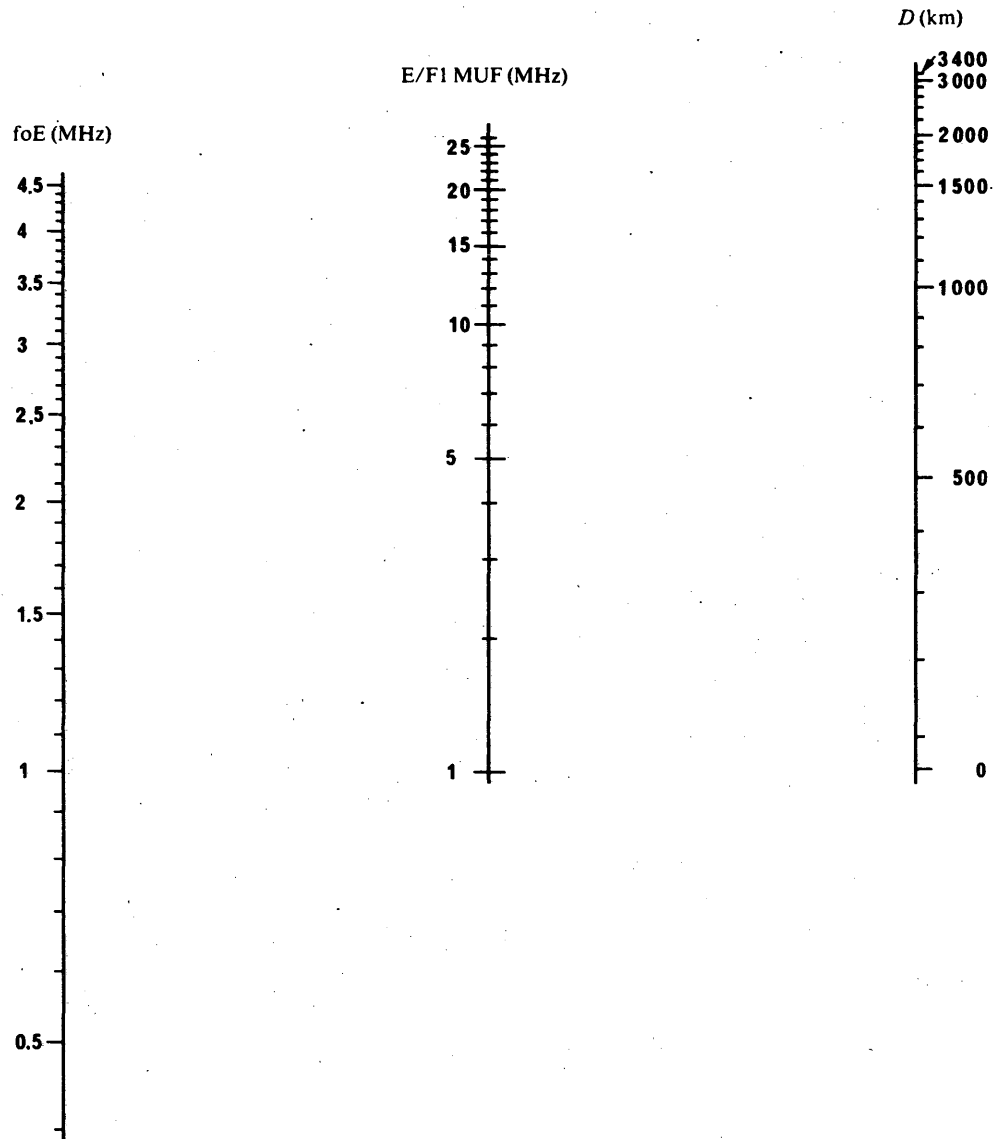


FIGURE 15 — Nomogram for transforming f_oE to $E/F1$ basic MUF at distance D

PAGE INTENTIONALLY LEFT BLANK

PAGE LAISSEE EN BLANC INTENTIONNELLEMENT

INFORME 340-5

ATLAS DEL CCIR DE LAS CARACTERÍSTICAS IONOSFÉRICAS

(Recomendación 434)

(1966-1970-1974-1978-1982-1986)

PARTE 1

GENERALIDADES

1.1 Introducción

El Atlas del CCIR de las características ionosféricas tiene por objeto presentar un compendio codificado de ciertas características fundamentales de la ionosfera que determinan la propagación ionosférica de las ondas radioeléctricas. Como los conocimientos actuales de las características de la ionosfera y de los diversos mecanismos de la propagación ionosférica distan mucho de ser completos, este Atlas es sólo provisional. A medida que vayan conociéndose mejor la física ionosférica y los mecanismos de la propagación ionosférica de las ondas radioeléctricas, podrán prepararse nuevas ediciones más completas.

Existen dos versiones del Atlas del CCIR de las características ionosféricas. La primera proporciona los coeficientes de las funciones para trazar los mapas numéricos de las características de la capa F2, que pueden obtenerse (dirigiéndose al Director del CCIR), en cinta magnética, junto con programas que permiten calcular esas funciones. Las características de las capas E y F1 se dan también como una serie de fórmulas, que están destinadas a los organismos internacionales — como la IFRB, por ejemplo — y cuantos tienen que resolver problemas de propagación ionosférica o realizar frecuentemente cálculos rutinarios. La versión en esta forma permite aprovechar las ventajas que en economía, comodidad y exactitud ofrecen las técnicas de computador.

La segunda versión del Atlas es la del presente Informe, en el que las características de la capa F2 se dan como una serie de diagramas trazados a base de las funciones numéricas contenidas en la versión en fichas perforadas. Estos diagramas están destinados a quienes no tienen acceso a un computador o necesitan una solución rápida y sencilla a los efectos de una planificación a largo plazo.

Las características de la capa F2 constituyen una parte importante de este Informe porque la capa F2 es de primordial importancia para determinar la propagación a gran distancia de las ondas decamétricas. Además, la representación adecuada de las complejas variaciones de la capa F2 en función de la ubicación geográfica, la hora del día, la estación del año y el ciclo de actividad solar requieren numerosos diagramas. Se incluyen nomogramas y diagramas del ángulo cenital del Sol destinados a determinar las características de la capa E normal y nomogramas y un diagrama de la latitud geomagnética para determinar las características de la capa F1 normal. Esta información sobre las características de la capa F2, la capa F1 y la capa E normal proporciona una base normalizada útil para los cálculos de la propagación ionosférica de las ondas radioeléctricas. Se dispone de información adicional sobre la capa E esporádica, la altura virtual mínima de las capas F1 y F2 y la capa F difusa sólo en forma de coeficientes numéricos.

La información básica puede aplicarse para resolver gran variedad de problemas. A menudo, para tratar un problema particular, se requerirán datos complementarios (por ejemplo: ruido radioeléctrico atmosférico, absorción, características de las antenas) procedentes de otras fuentes. El tipo de problema y los métodos preferidos de cálculo serán probablemente muy diversos y variarán en función de los usuarios. Se dispone de programas de computador para la solución de numerosos problemas de propagación ionosférica de las ondas radioeléctricas. Algunos se indican en la Resolución 63 y otros pueden hallarse en las publicaciones de diversas administraciones.

1.2 Terminología

En general, la terminología utilizada se ajusta a las recomendaciones del «World Wide Soundings Committee» [Piggott y Rawer, 1972 y 1978] y a la práctica normalmente seguida en las publicaciones especializadas, por ejemplo Davies [1965] y Alpert [1960].

Por «MUF de explotación» se entiende la frecuencia más elevada que permitiría la explotación aceptable de un servicio radioeléctrico entre terminales dados a una hora determinada y en condiciones específicas de trabajo (tales como tipos de antena, potencia del transmisor, clase de emisión, velocidad binaria de la información y relación señal/ruido requerida).

Por «MUF básica» se entiende la frecuencia más elevada a la que se pueden propagar las ondas radioeléctricas entre terminales dados, en una ocasión específica y solamente por refracción ionosférica.

La expresión «mapa numérico» sirve para designar una función $\Omega(\lambda, \theta, T)$, de tres variables (latitud λ , longitud θ y tiempo T) que representan las variaciones mundiales, geográficas y diurnas, de una característica de la ionosfera. El término «diagrama» designa la representación gráfica, por medio de curvas superpuestas a un mapa geográfico o a una retícula de coordenadas, de las variaciones de una característica ionosférica. Debe señalarse que, a partir del mapa numérico, puede establecerse todo un juego de diagramas para distintas horas UTC.

1.3 Predicción de índices solares e ionosféricos

El uso del presente Informe requiere predicciones de los índices solares R_{12} y Φ_{12} . En las circulares del CCIR así como en el Boletín de Telecomunicaciones se publican mensualmente los valores previstos y medidos de estos índices solares e ionosféricos. En la Recomendación 371 se dan definiciones de estos índices y de sus interrelaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL'PERT, Ya. L. [1960] *Radio Wave Propagation and the Ionosphere* (en ruso). Academia de Ciencias de la URSS.
- DAVIES, K. [1965] *Ionospheric radio propagation*. National Bureau of Standards Monograph 80, US Government Printing Office, Washington, DC 20402.
- PIGGOTT, W. R. y RAWER, K. [1972] *URSI Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction* (2nd Ed.). World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics. Report UAG-23, NOAA, Boulder, CO 80303, Estados Unidos de América. En LIARA (Argentina) existe una traducción en español de este texto, y en francés en el CNET (Francia).
- PIGGOTT, W. R. y RAWER, K. [1978] *URSI Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction* (2nd Ed.). Revision of chapters 1-4, World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics. Report UAG-23A, NOAA, Boulder, CO 80303, Estados Unidos de América.

PARTE 2

MAPAS NUMÉRICOS Y DIAGRAMAS RELATIVOS A LA CAPA F2 PREDICHA

2.1 Datos

Los datos en que se basan las funciones de los mapas numéricos y los diagramas relativos a la capa F2 se han deducido de sondeos ionosféricos verticales efectuados por numerosas estaciones terrestres de todo el mundo. Tales estaciones, explotadas por laboratorios de muchos países distintos, utilizan métodos normalizados de reducción de las observaciones [Piggott y Rawer, 1972 y 1978]. Durante el Año Geofísico Internacional aumentó mucho el número de estaciones ionosféricas que realizaron observaciones en gran número de nuevas ubicaciones, a fin de colmar las importantes lagunas existentes en la red mundial. No obstante, hay todavía vastas zonas del mundo, océanos en particular, sobre las que los datos son escasos o nulos. Pese a estas lagunas, la cobertura mundial de las observaciones basta para representar con bastante exactitud los aspectos principales de las variaciones mundiales de las características de la ionosfera.

Los datos básicos utilizados para las características de la capa F2 presentados en este Atlas son foF2, frecuencia crítica del rayo ordinario de incidencia vertical de la capa F2, y M(3000)F2, factor numérico que multiplicado por foF2, da la MUF básica para una distancia de 3000 km. El factor M(3000)F2 se deriva de los ionogramas de incidencia vertical utilizando una curva de transmisión normalizada u otros métodos equivalentes [Piggott y Rawer, 1972 y 1978; Davies, 1965].

Los dos parámetros foF2 y M(3000)F2 varían considerablemente de un día para otro en torno a sus valores medianos mensuales. Sin embargo, estos últimos muestran variaciones sistemáticas bastante regulares en función de la ubicación geográfica, de la hora del día, de la estación del año y de la actividad solar. Los mapas numéricos y los diagramas de la capa F2 del Atlas se han preparado a base de los valores medianos mensuales de foF2 y de M(3000)F2 obtenidos por las diversas estaciones ionosféricas.

Los datos correspondientes a los años 1954 a 1958 se han analizado mes por mes. Estos años son característicos de un periodo de actividad solar que va de un mínimo a un máximo. Además de los datos facilitados por las estaciones explotadas en esos años, se han podido utilizar, a título complementario, las observaciones de estaciones explotadas en otras épocas para colmar algunas de las importantes lagunas existentes en la red mundial. Esto fue particularmente útil en lo que respecta a 1954, año en el que la actividad solar fue mínima. Los datos obtenidos en 1954 hubieron de completarse con datos de 1964, que fue también un año de actividad solar mínima, a fin de poder disponer de suficiente información para el trazado de mapas de la casi totalidad del hemisferio austral.

2.2 Confección de mapas numéricos

El método utilizado para preparar los diagramas en este Informe y los mapas numéricos de la capa F2 fueron ideados por Jones y Gallet [1960, 1962a, 1962b y 1965]. Para el análisis de los datos se utilizó el tiempo universal en lugar de la hora local como se hacía anteriormente, y una inclinación magnética modificada como principal coordenada de latitud, en vez de la latitud geográfica [Jones y otros, 1969]. Estos cambios han permitido mejorar considerablemente la representación. En lo que respecta a los detalles de los métodos matemáticos y a la interpretación y uso en aplicaciones prácticas, conviene consultar los documentos originales. La breve descripción de la función numérica $\Omega(\lambda, \theta, T)$ que figura a continuación, está destinada a indicar la naturaleza y el significado de los coeficientes de los mapas numéricos de las características de la capa F2 utilizados para preparar los diagramas en este Atlas.

La forma general de la función numérica $\Omega(\lambda, \theta, T)$ es la serie de tiempo de Fourier:

$$\Omega(\lambda, \theta, T) = a_0(\lambda, \theta) + \sum_{j=1}^H [a_j(\lambda, \theta) \cos jT + b_j(\lambda, \theta) \sin jT] \quad (2.1)$$

donde:

λ : latitud geográfica ($-90^\circ \leq \lambda \leq 90^\circ$),

θ : longitud geográfica Este ($0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$),
(θ en grados al Este del meridiano de Greenwich),

T : tiempo universal (UTC) en grados de ángulo ($-180^\circ \leq T \leq 180^\circ$),

H : número máximo de armónicas utilizado para representar la variación diurna.

Los coeficientes de Fourier $a_j(\lambda, \theta)$ y $b_j(\lambda, \theta)$ varían en función de las coordenadas geográficas y están representados por series de la forma:

$$a_j(\lambda, \theta) = \sum_{k=0}^K U_{2j,k} G_k(\lambda, \theta), j = 0, 1, 2, \dots, H \quad (2.2a)$$

$$b_j(\lambda, \theta) = \sum_{k=0}^K U_{2j-1,k} G_k(\lambda, \theta), j = 1, 2, \dots, H \quad (2.2b)$$

La elección particular de las funciones $G_k(\lambda, \theta)$ se determina especificando los números enteros k ($k_0, k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_m; k_m = K$), siendo i el orden en longitud. Por consiguiente, un mapa numérico puede representarse más explícitamente como sigue:

$$\Omega(\lambda, \theta, T) = \sum_{k=0}^K U_{0,k} G_k(\lambda, \theta) + \sum_{j=1}^H \left[\cos jT \sum_{k=0}^K U_{2j,k} G_k(\lambda, \theta) + \sin jT \sum_{k=0}^K U_{2j-1,k} G_k(\lambda, \theta) \right] \quad (2.3)$$

En las ecuaciones (2.2a), (2.2b), y (2.3), $U_{2j,k}$ y $U_{2j-1,k}$ pueden expresarse en la forma $U_{s,k}$ donde s corresponde a $2j$ o a $2j-1$.

Para establecer los mapas numéricos, se ha utilizado la función:

$$I' = I / \sqrt{\cos \lambda} \quad (2.4)$$

donde I es la inclinación magnética y λ la latitud geográfica [Rawer, 1963]. Para eliminar las peculiaridades de I' en los polos geográficos, en el análisis de los datos de la inclinación magnética modificada para la preparación del mapa numérico de los parámetros de la capa F2 se ha utilizado $X = \arctg I'$. Como X es función de la latitud y de la longitud geográficas, no se modifica la expresión de $\Omega(\lambda, \theta, T)$ de la ecuación (2.3). El cuadro I muestra las funciones geográficas $G_k(\lambda, \theta)$.

La adopción de la inclinación magnética modificada como principal coordenada de latitud ha permitido una mejor representación mundial de las variaciones ionosféricas, particularmente en las regiones ecuatoriales y polares. Después de analizarse los datos, el programa de computador transformó las coordenadas en latitud y longitud geográficas, para la preparación de los diagramas del Atlas.

CUADRO I — Funciones geográficas $G_k(\lambda, \theta)$ (X es función de λ y de θ , m es el orden máximo en longitud)

$$q_0 = k_0; q_i (i = 1, m) = \frac{k_i - k_{i-1} - 2}{2}$$

k	Variación principal en latitud	k	Primer orden en longitud	k	Segundo orden en longitud	...	k	m orden en longitud
0	1	$k_0 + 1$	$\cos \lambda \cos \theta$	$k_1 + 1$	$\cos^2 \lambda \cos 2 \theta$	...	$k_{m-1} + 1$	$\cos^m \lambda \cos m \theta$
1	$\sin X$	$k_0 + 2$	$\cos \lambda \sin \theta$	$k_1 + 2$	$\cos^2 \lambda \sin 2 \theta$	...	$k_{m-1} + 2$	$\cos^m \lambda \sin m \theta$
2	$\sin^2 X$	$k_0 + 3$	$\sin X \cos \lambda \cos \theta$	$k_1 + 3$	$\sin X \cos^2 \lambda \cos 2 \theta$	...	$k_{m-1} + 3$	$\sin X \cos^m \lambda \cos m \theta$
		$k_0 + 4$	$\sin X \cos \lambda \sin \theta$	$k_1 + 4$	$\sin X \cos^2 \lambda \sin 2 \theta$	...	$k_{m-1} + 4$	$\sin X \cos^m \lambda \sin m \theta$
...		...		...			...	
k_0	$\sin^{q_0} X$	$k_1 - 1$	$\sin^{q_1} X \cos \lambda \cos \theta$	$k_2 - 1$	$\sin^{q_2} X \cos^2 \lambda \cos 2 \theta$	...	$k_m - 1$	$\sin^{q_m} X \cos^m \lambda \cos m \theta$
		k_1	$\sin^{q_1} X \cos \lambda \sin \theta$	k_2	$\sin^{q_2} X \cos^2 \lambda \sin 2 \theta$	...	k_m	$\sin^{q_m} X \cos^m \lambda \sin m \theta$

2.3 Coeficientes de foF2 y de M(3000)F2

2.3.1 Coeficientes de Oslo

El primer juego de coeficientes numéricos en los que se definen las variaciones diurnas y geográficas de foF2 (Oslo, 1966) [Jones y otros, 1969] está basado en una relación lineal con la actividad solar. Se recomienda su utilización en la planificación de frecuencias a largo plazo. Los coeficientes que representan los valores medianos mensuales de foF2 y M(3000)F2 son los valores de $U_{s,k}$ (véanse las ecuaciones (2.2) y (2.3)) que definen la función $\Omega(\lambda, \theta, T)$ del mapa numérico de la característica indicada para el mes y el nivel de actividad solar considerados. Existen para cada mes del año los coeficientes para foF2 y M(3000)F2, y para los dos niveles de actividad solar $R_{12} = 0$ y $R_{12} = 100$. R_{12} es la media móvil de R_f para 12 meses del número mensual de manchas solares y sirve de índice del nivel de actividad solar. Para cada característica de la capa F2, se han derivado coeficientes para cada mes de los años 1954 a 1958, utilizando los valores medianos mensuales resultantes de los sondeos de incidencia vertical efectuados por las estaciones ionosféricas. Los coeficientes de $R_{12} = 0$ y $R_{12} = 100$ para un mes dado del año se han determinado adaptando, por el método de los mínimos cuadrados, una línea recta a los valores de cada coeficiente de ese mes para los cinco años mencionados. El valor de cada coeficiente para $R_{12} = 0$ y $R_{12} = 100$ se calculó a base de la relación lineal. Hay que utilizar con prudencia estos coeficientes cuando los valores de $R_{12} > 150$ (véase el punto 2.4.2). Dichos coeficientes pueden obtenerse solicitándolos al Director del CCIR.

Los mapas numéricos basados en los coeficientes de Oslo pueden utilizarse también para calcular los valores de foF2 mediante el índice ionosférico IG [Liu y otros, 1983]. El procedimiento consiste en definir de nuevo los valores de referencia de los mapas de modo que $IG_{12} = 0$ e $IG_{12} = 100$, en vez de $R_{12} = 0$ y $R_{12} = 100$. El valor de foF2 para un IG_{12} determinado se obtiene entonces por interpolación o extrapolación lineal, utilizando IG_{12} en vez de R_{12} en la ecuación (2.5). La relación lineal es aplicable a toda la gama de actividad solar.

2.3.2 Coeficientes de Nueva Delhi

Puede solicitarse al Director del CCIR un segundo juego de coeficientes numéricos en los que se definen las variaciones diurnas, geográficas, estacionales y undecenales (ciclo de actividad solar) de la frecuencia crítica de la capa F2 (foF2). Con este juego de coeficientes (Nueva Delhi, 1970), pueden centrarse en un día cualquiera del año los valores de la mediana mensual prevista de foF2 [Jones y Obitts, 1970]. Se ha utilizado un polinomio de segundo grado para representar la variación del ciclo solar. Se recomienda utilizar esos coeficientes en los programas de predicciones a corto plazo.

2.4 Diagramas de F2(CERO)MUF básica y F2(4000)MUF

2.4.1 Descripción

F2(CERO)MUF es la frecuencia básica utilizable para la distancia cero, o incidencia vertical. Corresponde a la $f_x F_2$, que es la frecuencia crítica del rayo extraordinario de incidencia vertical. Los valores F2(CERO)MUF de las previsiones se han obtenido agregando la mitad del valor de la girofrecuencia al valor de la foF2, calculado mediante los coeficientes de los mapas numéricos para el mes y el valor de R_{12} correspondientes. Generalmente, el error de esta aproximación no es importante, comparado con otras incertidumbres de los mapas numéricos y de los diagramas. Puede serlo únicamente cuando la foF2 está próxima de la girofrecuencia o es inferior a ella. Si se desea, puede aplicarse a los valores de foF2, calculados a base de los coeficientes de los mapas numéricos, la expresión más precisa derivada de la teoría magnetoiónica.

F2(4000)MUF es la frecuencia básica máxima utilizable en el caso de propagación con una reflexión en la capa F2, para una distancia de 4000 km. Los valores de las previsiones correspondientes a la F2(4000)MUF se obtuvieron multiplicando por 1,1 el producto de los valores de foF2 y de M(3000)F2. Este factor 1,1 es el valor medio de la relación entre M(4000)F2 y M(3000)F2.

Las figuras de las páginas 86 a 373 del Informe 340-4 (Ginebra, 1983) muestran curvas de F2(CERO)MUF y F2(4000)MUF para cada hora par, tiempo universal, para cada mes del año y para $R_{12} = 0$ y $R_{12} = 100$. Estas curvas se han calculado a base de los correspondientes mapas numéricos.

2.4.2 Interpolación — R_{12} y distancia

En la mayor parte de las aplicaciones, basta con admitir que las variaciones de foF2 y de M(3000)F2, en función de R_{12} , son lineales. La relación entre M(3000)F2 y R_{12} es efectivamente lineal en toda la gama de valores de R_{12} .

Aunque el nivel de actividad solar con el que la relación entre foF2 y R_{12} pasa a ser no lineal está en función de la ubicación geográfica, la hora del día y la estación, la desviación más perceptible de la linealidad se da con valores de R_{12} superiores a 150 aproximadamente. Si el valor de R_{12} es superior a 150, puede reducirse el error suponiendo que ese valor más elevado es en realidad de 150.

La relación lineal entre foF2 y R_{12} permite interpolar entre 0 y 100 y extrapolar por encima de 100, mediante la fórmula:

$$foF2 = f_0 + 0,01 (f_{100} - f_0) R_{12} \quad (2.5)$$

siendo f_0 el valor de foF2 para $R_{12} = 0$ y f_{100} su valor para $R_{12} = 100$.

Análogamente:

$$M(3000)F2 = m_0 + 0,01(m_{100} - m_0) R_{12} \quad (2.6)$$

siendo m_0 el valor de M(3000)F2 para $R_{12} = 0$ y m_{100} el valor para $R_{12} = 100$. Pueden emplearse relaciones similares para calcular los valores de F2(CERO)MUF y de F2(4000)MUF cuando R_{12} difiere de 0 y de 100.

Las figs. 10 y 11 que contienen respectivamente un mapa del mundo y una representación de círculos máximos, a la misma escala que los diagramas de las curvas, tienen por objeto facilitar la determinación de las ubicaciones de los trayectos, las distancias a lo largo del círculo máximo y los puntos de reflexión. Para determinar el valor de la MUF básica de la capa F2 para distancias comprendidas entre 0 y 4000 km utilizando los diagramas relativos a esa capa, hay que interpolar los valores de F2(CERO)MUF y de F2(4000)MUF para una ubicación dada. A tal fin, debe utilizarse el nomograma (fig. 12). Para distancias superiores a 4000 km, puede emplearse el método de los dos puntos de control (véase la parte 9), o dividir el trayecto en dos o más saltos de 4000 km como máximo. Si se adopta este último método, son posibles dos o más combinaciones de saltos.

En la parte 9 se presenta un método manual detallado para calcular la MUF básica que comprende la F2(D)MUF en trayectos de más de 4000 km y de menos de 4000 km de longitud.

La parte 11 contiene la versión correspondiente para computador.

2.5 Evaluación de la F2(D)MUF por computador

El nomograma (fig. 12) da la F2(D)MUF en función de la F2(CERO)MUF y la F2(4000)MUF, cuando estos factores pueden derivarse de gráficos o en términos de las características ionosféricas foF2, M(3000)F2 y f_H . Para las aplicaciones de computador, se logra un mayor grado de precisión con las ecuaciones de Lockwood [1983].

$$F2(D)MUF = \left[1 + \left\{ \frac{C_D}{C_{3000}} \right\} \left\{ B - 1 \right\} \right] \cdot foF2 + \frac{f_H}{2} \left(1 - \frac{D}{4000} \right) \quad (2.7)$$

donde:

$$C_D = 0,72 - 0,628z - 0,451z^2 - 0,03z^3 + 0,194z^4 + 0,158z^5 + 0,037z^6 \quad (2.8)$$

$$z = 1 - 2D/D_{\max} \quad (2.9)$$

$$D_{\max} = 3940 + \left\{ 9900 + \frac{15\,375}{x^2} + \frac{106\,700}{x^5} \right\} \left\{ \frac{1}{B} - 0,258 \right\} \quad (2.10)$$

y:

$$B = M(3000) - 0,124 + \left(M(3000)^2 - 4 \right) \left(0,0215 + 0,005 \operatorname{sen} \left\{ \frac{7,854}{x} - 1,9635 \right\} \right) \quad (2.11)$$

donde

D y $D_{\max}$ se expresan en kilómetros,

C_{3000} : valor de C_D para una distancia de 3000 km, y

$x = foF2/foE$, ó 2 tomándose el mayor de estos dos valores.

2.6 Modelo de campo magnético

Se utiliza un modelo del campo magnético de la Tierra para la época de 1960, fundado en un análisis esféricoarmónico de sexto orden [Jensen y Cain, 1962] con objeto de determinar la inclinación magnética modificada y la girofrecuencia requeridas para la evaluación de los mapas numéricos. La época de 1960 debe ser utilizada, con preferencia a otra de interés, porque es la utilizada para generar los valores de los coeficientes numéricos.

La inducción magnética F_x , F_y y F_z en gauss a lo largo del Norte geográfico, el Este y direcciones verticalmente descendentes viene dada respectivamente por:

$$F_x = \sum_{n=1}^6 \sum_{m=0}^n x_n^m \left[g_n^m \cos m\theta + h_n^m \operatorname{sen} m\theta \right] R^{n+2} \quad (2.12a)$$

$$F_y = \sum_{n=1}^6 \sum_{m=0}^n y_n^m \left[g_n^m \operatorname{sen} m\theta - h_n^m \cos m\theta \right] R^{n+2} \quad (2.12b)$$

$$F_z = \sum_{n=1}^6 \sum_{m=0}^n z_n^m \left[g_n^m \cos m\theta + h_n^m \operatorname{sen} m\theta \right] R^{n+2} \quad (2.12c)$$

donde:

$$x_n^m = \frac{d}{d\varphi} \left(P_{n,m}(\cos \varphi) \right) \quad (2.13a)$$

$$y_n^m = m \cdot \frac{P_{n,m}(\cos \varphi)}{\operatorname{sen} \varphi} \quad (2.13b)$$

$$z_n^m = -(n+1)P_{n,m}(\cos \varphi) \quad (2.13c)$$

con:

φ : colatitud Norte ($= 90^\circ - \lambda$), donde λ es la latitud geográfica en grados (positivos en el hemisferio Norte, $-90^\circ \leq \lambda \leq 90^\circ$)

$P_{n,m}(\cos \varphi)$: función de Legendre asociada, definida como:

$$P_{n,m}(\cos \varphi) = \sin^m \varphi \left[\cos^{n-m} \varphi - \frac{(n-m)(n-m-1)}{2(2n-1)} \cos^{n-m-2} \varphi + \frac{(n-m)(n-m-1)(n-m-2)(n-m-3)}{(2)(4)(2n-1)(2n-3)} \cos^{n-m-4} \varphi + \dots \right] \quad (2.14)$$

g_n^m y h_n^m : coeficientes numéricos para el modelo de campo en gauss.

R : factor de escala dependiente de la altura, cuya fórmula es:

$$R = \frac{6371,2}{6371,2 + h_r} \quad (2.15)$$

donde:

h_r : altura a la que se evalúa el campo (que se supone de 300 km).

El campo magnético total, F , será:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (2.16)$$

La inclinación magnética I y la girofrecuencia f_H , en MHz, se determinan a partir de:

$$I = \text{tg}^{-1} \left(\frac{F_z}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}} \right) \quad (2.17)$$

y:

$$f_H = 2,8F \quad (2.18)$$

La inclinación magnética modificada I' se expresa en términos de inclinación magnética según la ecuación (2.4).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DAVIES, K. [1965] Ionospheric radio propagation. National Bureau of Standards Monograph 80. US Government Printing Office, Washington, DC 20402.
- JENSEN, D. C. y CAIN, J. C. [1962] Interim magnetic field. *J. Geophys. Res.*, **9**, 3568-3569.
- JONES, W. B. y GALLET, R. M. [1960] La construcción de mapas ionosféricos numéricos. *Boletín de Telecomunicaciones*, Vol. 27, **12**, 280-282.
- JONES, W. B. y GALLET, R. M. [1962a] Representación por métodos numéricos de las variaciones diurnas y geográficas de los datos ionosféricos. *Boletín de Telecomunicaciones*, Vol. 29, **5**, 129-147. Publicado asimismo en el *J. Res. NBS-D*, Vol. 66D (Radio Propagation), **4**, 419-438.
- JONES, W. B. y GALLET, R. M. [1962b] Methods for applying numerical maps of ionospheric characteristics. *J. Res. NBS-D*, Vol. 66D (Radio Propagation), **6**, 649-662.
- JONES, W. B. y GALLET, R. M. [1965] Representación por métodos numéricos de las variaciones diurnas y geográficas de las características ionosféricas, II, control de las inconsistencias. *Boletín de Telecomunicaciones*, Vol. 32, **1**, 18-28.
- JONES, W. B., GRAHAM, R. P. y LEFTIN, M. [1969] Advances in ionospheric mapping by numerical methods. ESSA Tech. Report ERL 107-ITS 75, US Government Printing Office, Washington, DC 20402.
- JONES, W. B. y OBITTS, D. L. [1970] Global representation of annual and solar cycle variation of foF2 monthly median 1954-1958. Telecommunications Research Report, OT/ITS/RR3, US Government Printing Office, Washington, DC 20402.
- LIU, R. Y., SMITH, P. A. y KING, J. W. [1983] Un nuevo índice solar que mejora la predicción de foF2 mediante el Atlas del CCIR. *Boletín de Telecomunicaciones*, Vol. 50, **8**, 408-414.

- LOCKWOOD, M. [1983] A simple M-factor algorithm for improved estimation of the basic maximum usable frequency of radio waves reflected from the ionospheric F region. *Proc. IEE*, Vol. 130F, 296-302.
- PIGGOTT, W. R. y RAWER, K. [1972] *URSI Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction* (2nd. Ed.). World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics. Report UAG-23, NOAA, Boulder, CO 80303, Estados Unidos de América. En LIARA (Argentina) existe una traducción en español de este texto, y en francés en el CNET (Francia).
- PIGGOTT, W. R. y RAWER, K. [1978] *URSI Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction* (2nd Ed.). Revision of chapters 1-4, World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics. Report UAG-23A, NOAA, Boulder, CO 80303, Estados Unidos de América.
- RAWER, K. [1963] *Meteorological and Astronomical Influences on Radio-Wave Propagation*, 221-250. Pergamon Press, Nueva York, NY, Estados Unidos de América.

PARTE 3

PREDICCIÓN DE foE Y DE LA MUF BÁSICA DE LA CAPA E

3.1 Introducción

Dos métodos se proponen para determinar la MUF básica de la capa E normal. El primero en forma de una serie de fórmulas empíricas, se presta especialmente para el computador. El segundo es una simple aproximación, idónea para uso manual.

3.2 Predicción empírica de foE y de la MUF básica de la capa E

3.2.1 Predicción de foE

Un método para predecir la mediana mensual de foE se describe en [Muggleton, 1975], basado en todos los datos de 55 estaciones ionosféricas publicados en los años 1944-1973.

Con foE expresado en MHz:

$$(foE)^4 = A B C D \quad (3.1)$$

donde A es el factor de actividad solar que viene dado por:

$$A = 1 + 0,0094 (\Phi - 66) \quad (3.2)$$

Φ : mediana mensual del flujo de ruido radioeléctrico solar observado en 10,7 cm, expresado en unidades de $10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$. Con fines de predicción resulta adecuado aproximar Φ por una estimación de Φ_{12} , valor suavizado (12 meses) de Φ .

B es el factor de variación estacional que viene dado por:

$$B = \cos^m N \quad (3.3)$$

donde:

$N = \lambda - \delta$ para $|\lambda - \delta| < 80^\circ$ y $N = 80^\circ$ para $|\lambda - \delta| \geq 80^\circ$.

λ : latitud geográfica, que se considera positiva en el hemisferio Norte.

δ : declinación solar que se considera positiva para declinaciones septentrionales.

El exponente m es una función de la latitud geográfica λ :

$$m = -1,93 + 1,92 \cos \lambda \quad \text{para } |\lambda| < 32^\circ \quad (3.4a)$$

o:

$$m = 0,11 - 0,49 \cos \lambda \quad \text{para } |\lambda| \geq 32^\circ \quad (3.4b)$$

C es el factor principal de latitud, que viene dado por:

$$C = X + Y \cos \lambda \quad (3.5a)$$

donde:

$$X = 23, Y = 116 \quad \text{para } |\lambda| < 32^\circ \quad (3.5b)$$

o:

$$X = 92, Y = 35 \quad \text{para } |\lambda| \geq 32^\circ \quad (3.5c)$$

D es el factor para tener en cuenta la hora del día:

Caso 1: $\chi \leq 73^\circ$

$$D = \cos^p \chi \quad (3.6a)$$

donde χ es el ángulo cenital solar en grados. Para $|\lambda| \leq 12^\circ$, $p = 1,31$; para $|\lambda| > 12^\circ$, $p = 1,20$.

Caso 2: $73^\circ < \chi < 90^\circ$

$$D = \cos^p (\chi - \delta\chi) \quad (3.6b)$$

donde:

$$\delta\chi = 6,27 \times 10^{-13} (\chi - 50)^8 \quad \text{grados} \quad (3.6c)$$

el valor de p es el mismo que en el caso 1.

Caso 3: $\chi \geq 90^\circ$

El valor de D durante la noche, para $\chi \geq 90^\circ$, es el mayor de los dos siguientes:

$$D = (0,072)^p \exp(-1,4 h) \quad (3.6d)$$

o:

$$D = (0,072)^p \exp(25,2 - 0,28 \chi) \quad (3.6e)$$

siendo h el número de horas después del ocaso ($\chi = 90^\circ$). En condiciones de invierno polar, cuando el Sol no sale, se debe utilizar la ecuación (3.6e). p tiene el mismo valor que en el primer caso.

El valor mínimo de foE, según Wakai [1971] viene dado por:

$$(\text{foE})_{\text{minima}}^4 = 0,004 (1 + 0,021 \Phi)^2 \quad (3.7)$$

donde Φ puede aproximarse por una estimación de Φ_{12} , valor suavizado (12 meses) de Φ .

Por la noche, si el valor de foE calculado por las ecuaciones (3.1) a (3.6e) es inferior al calculado por la ecuación (3.7), debe tomarse este último valor.

Las pruebas destinadas a comprobar la precisión del método descrito han permitido determinar una desviación típica media de 0,11 MHz para una base de datos correspondiente a más de 80 000 comparaciones horarias para las 55 estaciones consideradas.

3.2.2 Predicción de la MUF básica de la capa E

La propagación ionosférica vía reflexiones únicas y múltiples de la capa E es importante para las distancias de transmisión inferiores a 2300 km. En tales distancias puede determinarse la MUF básica de un modo de propagación en particular como el producto del valor a medio trayecto de foE y el factor M para una distancia de transmisión igual al trayecto simple equivalente.

La fig. 1 da el factor M basándose en cálculos del trayecto del rayo para un modelo parabólico de la capa E con $h_m E = 110$ km, $y_m E = 20$ km, despreciando los efectos del campo magnético de la Tierra. La curva puede calcularse aproximadamente mediante la ecuación:

$$\text{Factor } M = 3,94 + 2,80x - 1,70x^2 - 0,60x^3 + 0,96x^4 \quad (3.8)$$

donde:

$$x = \frac{d - 1150}{1150}$$

y d representa la distancia de transmisión en kilómetros.

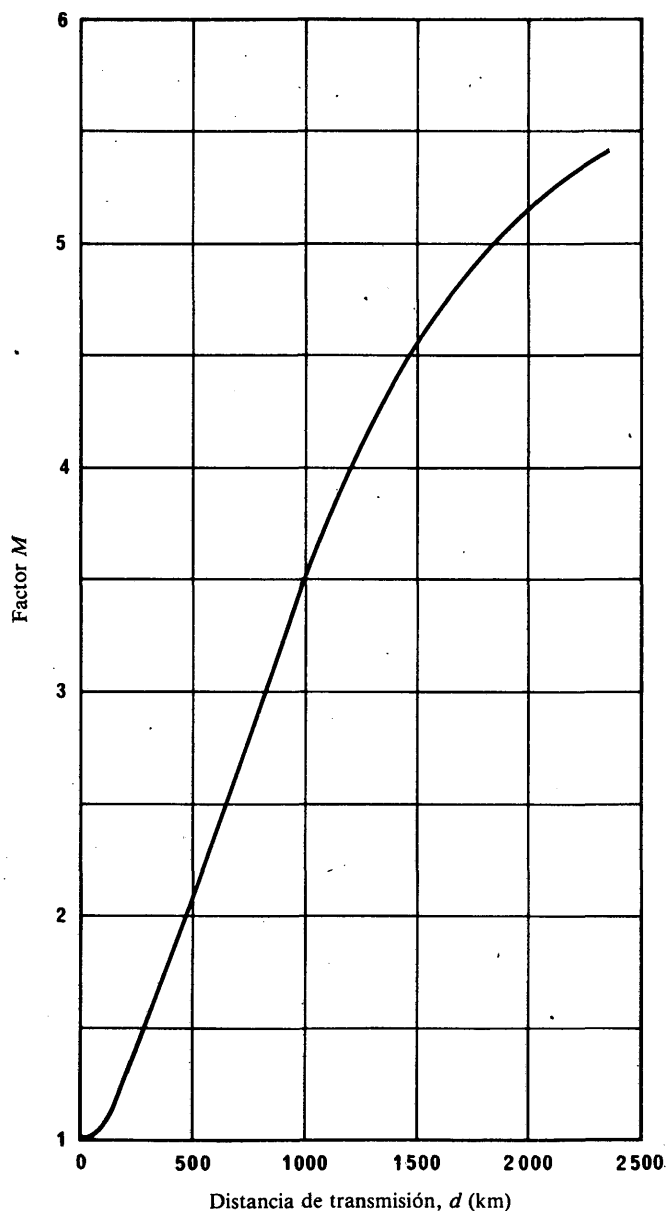


FIGURA 1 – Factor M para la distancia de transmisión d (km) en la capa E

3.3 Predicción manual de foE y de la MUF básica de la capa E

El método aproximado expuesto a continuación, que se puede utilizar manualmente, da resultados razonablemente satisfactorios durante las horas del día. Aunque el método permite la determinación de la MUF básica de la capa E durante las 24 horas del día, la ionización de la capa E por la noche es muy baja, por lo que no suele influir en la propagación de las ondas decamétricas.

Se utilizó una relación empírica dada por Davies [1965] para determinar la foE para $\chi < 80^\circ$ y la media de los valores de foE a partir del método descrito en el punto 3.2.1 para $80^\circ \leq \chi < 116^\circ$. Para $\chi \geq 116^\circ$, el valor límite durante la noche está de acuerdo con los resultados obtenidos por Wakai [1971].

Las páginas 377 a 388 del Informe 340-4 (Ginebra, 1983) contienen diagramas del ángulo cenital del Sol para cada mes, trazados a la misma escala que los relativos a la capa F2. No obstante, las curvas se han trazado en función de la latitud y de la hora local. Por consiguiente, para comparar la MUF básica de la capa E normal con la MUF básica de la capa F2 es preciso transformar la hora local en tiempo universal.

El valor del ángulo cenital se lee directamente en el diagrama del ángulo cenital del Sol, correspondiente a la latitud y a la hora consideradas. La foE se puede determinar a partir del nomograma (fig. 14) y la MUF básica de la capa E a partir del nomograma (fig. 15). La MUF básica de la capa F1 incluida en el nomograma se determinó prolongando la curva del factor M , fig. 1, hasta distancias de 3400 km. En la parte 4 se da un método más preciso y exacto para determinar la MUF básica de la capa F1.

La parte 9 contiene un método manual detallado para determinar la MUF básica del trayecto que incorpora tolerancias para la E/F1 MUF básica para distancias hasta 3400 km, junto con la MUF básica de la capa F2 para cualquier distancia.

La parte 11 presenta la correspondiente versión por computador.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DAVIES, K. [1965] Ionospheric radio propagation. National Bureau of Standards Monograph 80. US Government Printing Office, Washington, DC 20402.
- MUGGLETON, L. M. [1975] A method of predicting foE at any time and place. *Boletín de Telecomunicaciones*, Vol. 42, 413-418.
- WAKAI, N. [1971] Study on the night-time E region and its effect on the radio wave propagation. *J. Radio Res. Labs.* (Japón), Vol. 18, 245-348.

PARTE 4

PREDICCIÓN DE foF1 Y DE LA MUF BÁSICA DE LA CAPA F1

4.1 Introducción

Se presenta un método de predicción mediana mensual de la MUF básica de la capa F1 en el que se considera esta última por separado y no como extensión del sistema de predicción de la capa E. Las expresiones deducidas para predecir la frecuencia crítica de la capa F1 se basan en datos recogidos de 1954 a 1966 en 39 estaciones ionosféricas de ambos hemisferios [DuCharme y otros, 1973]. El personal de las estaciones ionosféricas de numerosos países utiliza métodos normalizados para el análisis de las observaciones ionosféricas [Piggott y Rawer, 1972 y 1978]. La MUF básica de la capa F1 para un circuito oblicuo se determina conociendo la frecuencia de penetración en el punto medio del trayecto y un factor de la M de la capa F1 correspondiente a la distancia de círculo máximo adecuada [Petrie y Stevens, 1965].

4.2 Determinación de la frecuencia crítica de la capa F1

Varios investigadores [Scott, 1952; Allen, 1948; Ratcliffe y Weekes, 1960] señalan que la frecuencia crítica de la capa F1, foF1, varía en función del ángulo cenital del Sol y su comportamiento puede representarse con suficiente precisión mediante la ecuación:

$$foF1 = f_s \cos^n \chi \quad (4.1)$$

donde $\chi \leq \chi_m$, ángulo cenital máximo del Sol, desde el cual se observa la capa F1 en una ubicación determinada, y donde los parámetros f_s y n [Scott, 1952; Harnischmacher, 1950], dependen de la actividad solar y de la ubicación.

No obstante, hay ocasiones en que la variación diurna de f_oF_1 en ubicaciones próximas al ecuador es independiente del ángulo cenital del Sol en periodos de intensa actividad solar [Lange-Hesse, 1959], pero depende de las variaciones de los índices fotoquímicos.

Distintos investigadores [Theissen, 1953; Davies, 1965] han establecido la variación de los parámetros f_s y n con la actividad solar. Han determinado la existencia de una relación aproximadamente lineal entre las características de la capa F1 y varios índices ionosféricos y solares [DuCharme y otros, 1973]. El índice ionosférico I_{F_2} [Minnis, 1955] da una representación de esos parámetros algo mejor que el valor medio aproximado durante 12 meses del número de manchas solares (R_{12}). No obstante el índice R_{12} debe utilizarse para la predicción de f_oF_1 , puesto que éste se recomienda para todas las predicciones ionosféricas con más de 12 meses de antelación (Recomendación 371).

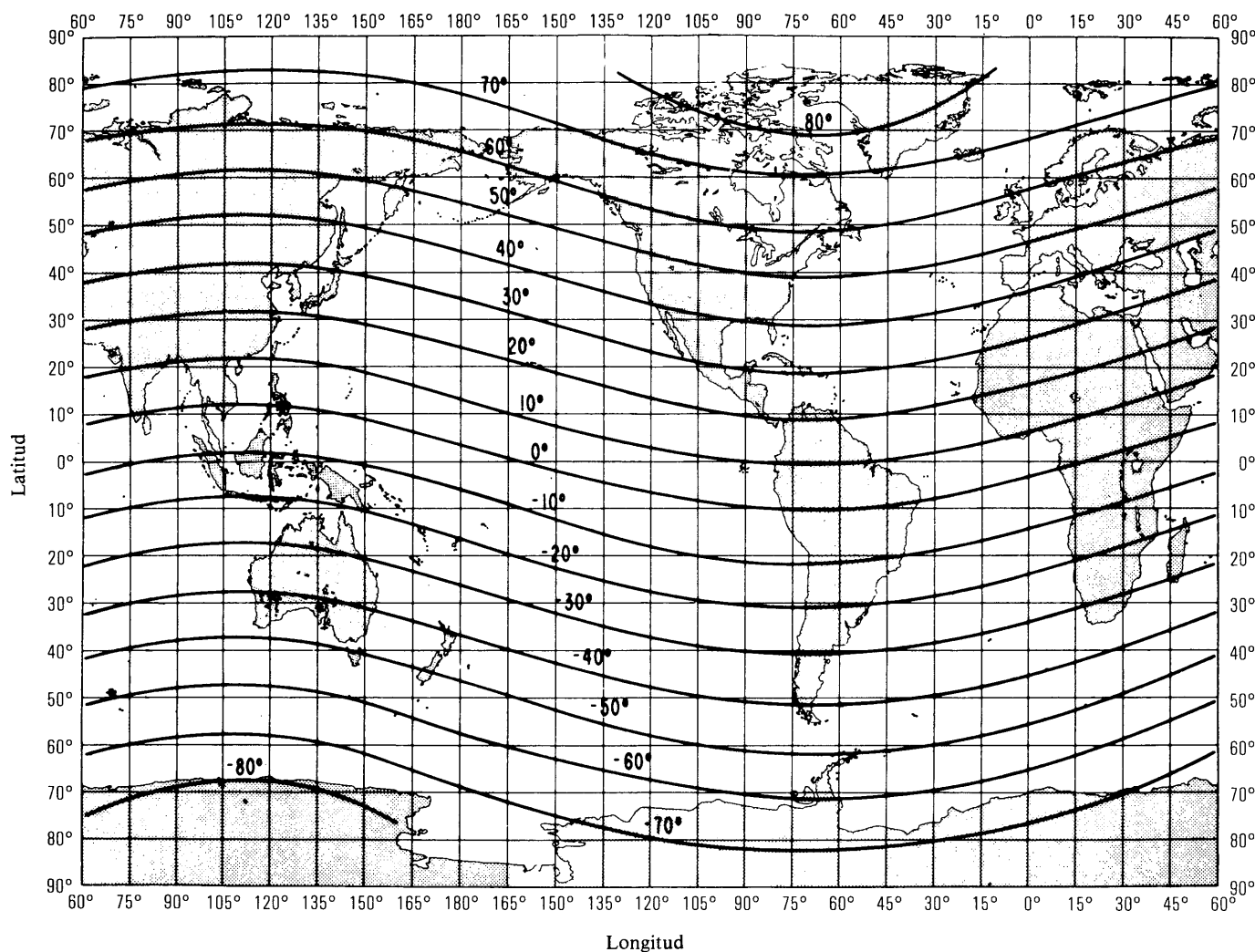


FIGURA 2 — Latitudes geomagnéticas

Este mapa se ha establecido a partir del campo geomagnético internacional de referencia, para el año 1965. (Polo geomagnético Norte: 78,8° N, 70,0° W y polo geomagnético Sur: 78,8° S, 110,0° E.)

Extraído de:

CAMBELL, W.H. [junio de 1972] Introduction to solar terrestrial activity for geomagnetic studies, Part II: The Earth's main field. NOAA Technical Report ERL 244-SEL 23, US Government Printing Office, Washington, DC 20402.

Kervin [1967] ha establecido diferencias de comportamiento de la foF1 en regiones de América del Norte y de Europa, pero tales diferencias se reducen considerablemente si se representan los datos en función de la latitud geomagnética. Esta última coordenada permite obtener una mejor representación de las variaciones de la capa F1 que cuando se establecen en función de otras coordenadas como la inclinación geográfica magnética, la inclinación magnética modificada o la latitud magnética constante [DuCharme y otros, 1973].

Un análisis de los valores de foF1 demuestra que dicha característica puede derivarse para cualquier valor de R_{12} de las siguientes expresiones:

$$foF1 = f_s \cos^n \chi \quad (4.2)$$

donde:

$$\begin{aligned} f_s &= f_{s_0} + 0,01 (f_{s_{100}} - f_{s_0}) R_{12} \\ f_{s_0} &= 4,35 + 0,0058 \lambda - 0,000120 \lambda^2 \\ f_{s_{100}} &= 5,35 + 0,0110 \lambda - 0,000230 \lambda^2 \\ n &= 0,093 + 0,00461 \lambda - 0,0000540 \lambda^2 + 0,00031 R_{12} \end{aligned}$$

siendo λ la latitud geomagnética en grados.

El ángulo cenital máximo del Sol en que está presente la capa F1 viene dado por las siguientes expresiones:

$$\chi_m = \chi_0 + 0,01 (\chi_{100} - \chi_0) R_{12} \text{ (grados)} \quad (4.3)$$

donde:

$$\begin{aligned} \chi_0 &= 50,0 + 0,348 \lambda \\ \chi_{100} &= 38,7 + 0,509 \lambda \end{aligned}$$

Se representa un mapa del mundo (fig. 10) y un trazado de círculos máximos (fig. 11) así como un mapa de la latitud geomagnética (fig. 2), para facilitar la determinación de las ubicaciones de los trayectos, de la distancia de círculo máximo y de los puntos de reflexión. Conociendo la latitud geomagnética en el punto de reflexión pueden determinarse los parámetros f_s , n y χ_m para cualquier valor de R_{12} utilizando los datos de las figs. 3, 4 y 5. Empleando el nomograma de la fig. 6, puede determinarse el valor de foF1 si se conocen f_s , n y χ . Existen gráficos del ángulo cenital del Sol según los meses (véase páginas 377 a 388 del Informe 340-4 (Ginebra, 1983)). El cálculo de la foF1 es valedero sólo para el caso de que $\chi \leq \chi_m$.

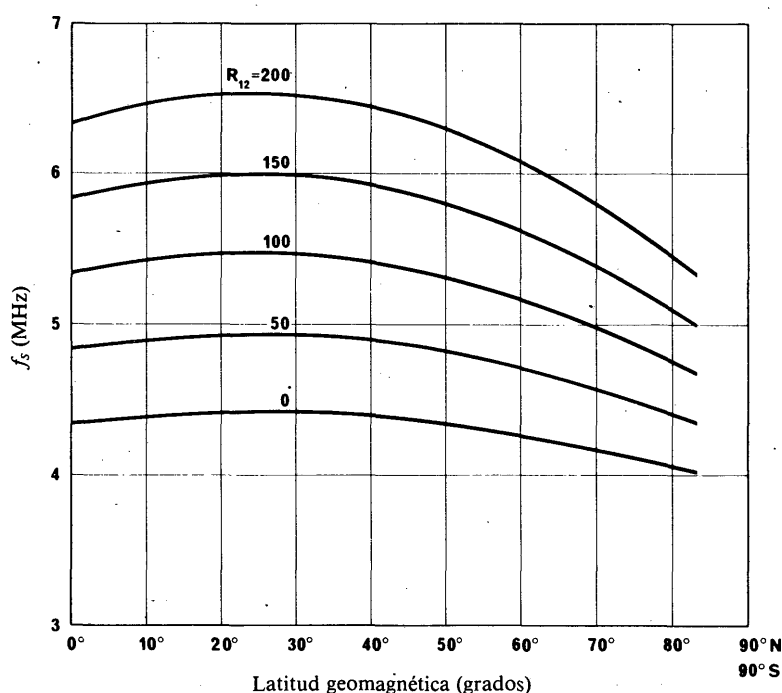


FIGURA 3 - Variación de f_s en función de la latitud geomagnética y de R_{12}

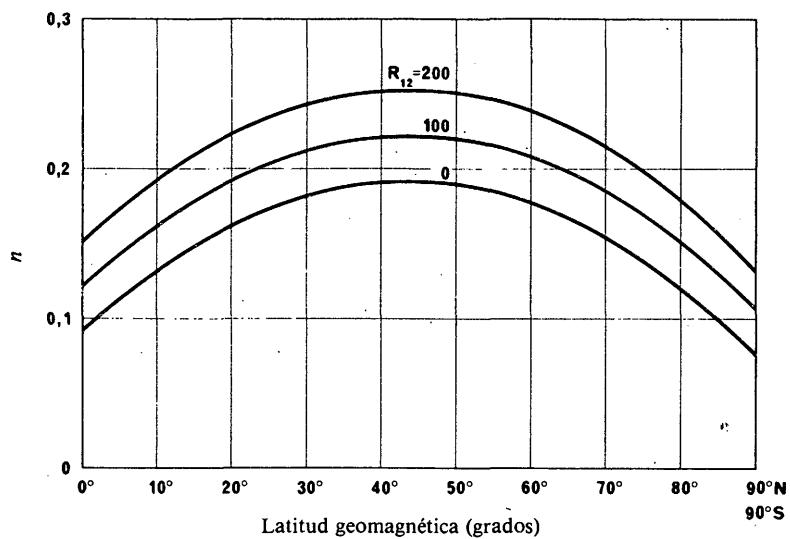


FIGURA 4 – Variación de n en función de la latitud geomagnética y de R_{12}

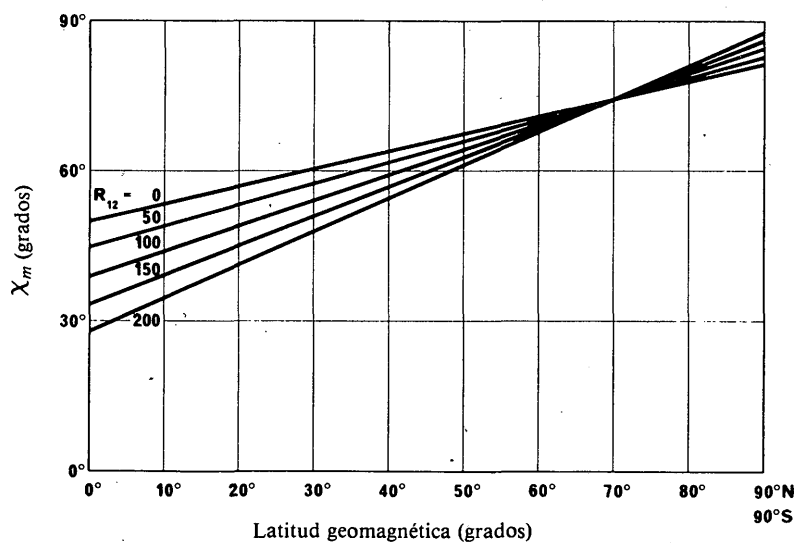


FIGURA 5 – Variación de X_m en función de la latitud geomagnética y de R_{12}

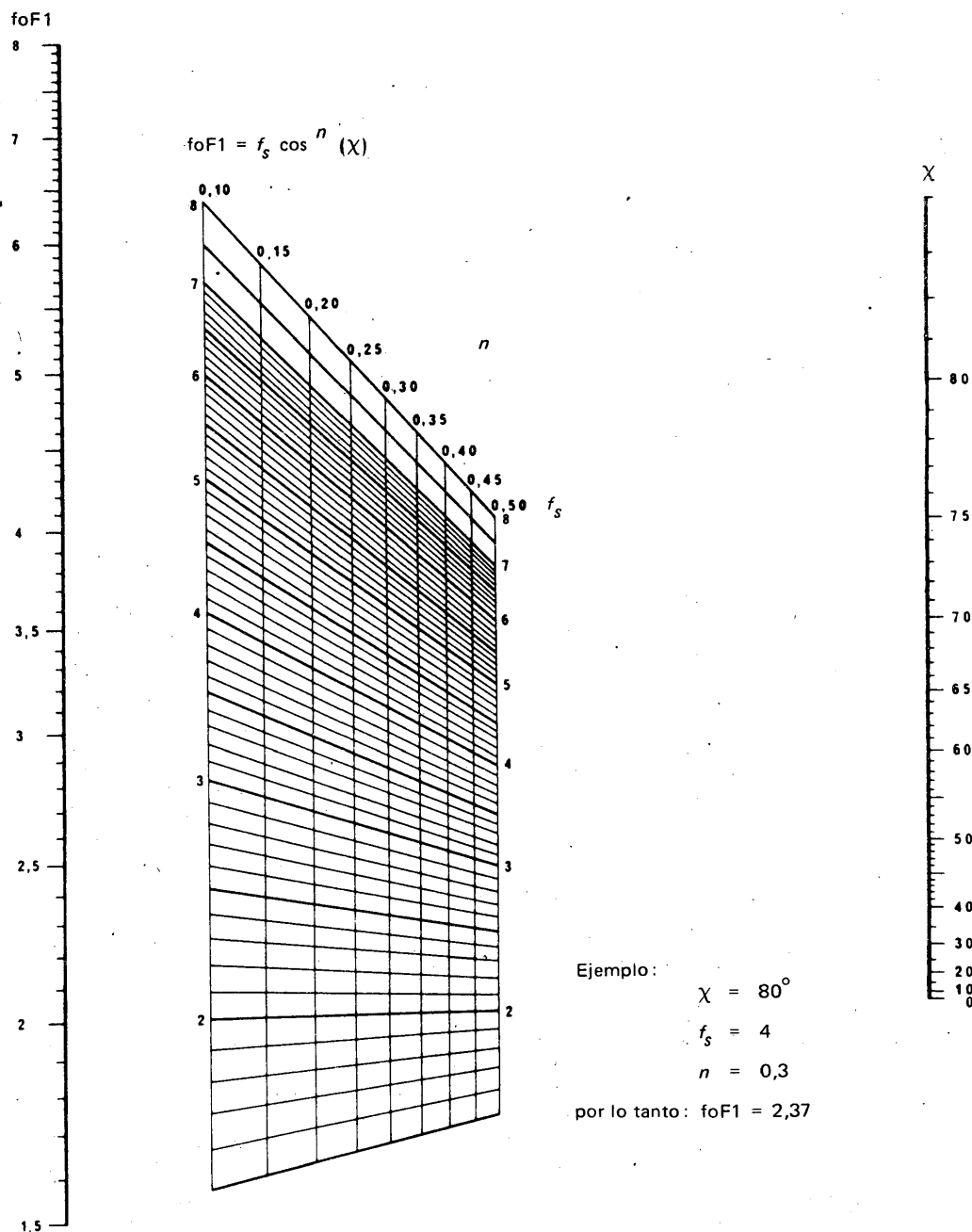


FIGURA 6 - Nomograma para la determinación de foF1

4.3 Determinación de la MUF básica de la capa F1

La propagación ionosférica por la capa F1 es importante para distancias de transmisión entre 2000 y 3400 km, en latitudes medias y elevadas, durante los meses de verano. Para las mencionadas distancias de transmisión se han establecido los factores M de la capa F1 [Petrie y Stevens, 1965] para el cálculo de la MUF básica. Estos factores se han deducido de cálculos de trazado de rayos en perfiles de densidad electrónica en función de la altura, obtenidos en base a ionogramas representativos de medio día en latitudes medias y altas. Se supone que estos factores se aplican a todos los ángulos cenitales del Sol. El factor M , para R_{12} comprendido entre 0 y 150, puede determinarse a base de las siguientes expresiones numéricas:

$$\text{Factor } M = J_0 - 0,01 (J_0 - J_{100}) R_{12} \quad (4.4)$$

donde:

$$J_0 = 0,16 + 2,64 \times 10^{-3} D - 0,40 \times 10^{-6} D^2$$

$$J_{100} = -0,52 + 2,69 \times 10^{-3} D - 0,39 \times 10^{-6} D^2$$

siendo D la distancia de círculo máximo en kilómetros (entre 2000 y 3400 km).

Para cálculos manuales el factor M puede elegirse en la fig. 7. La MUF básica de la capa F1 se calcula multiplicando la foF1 por el factor M .

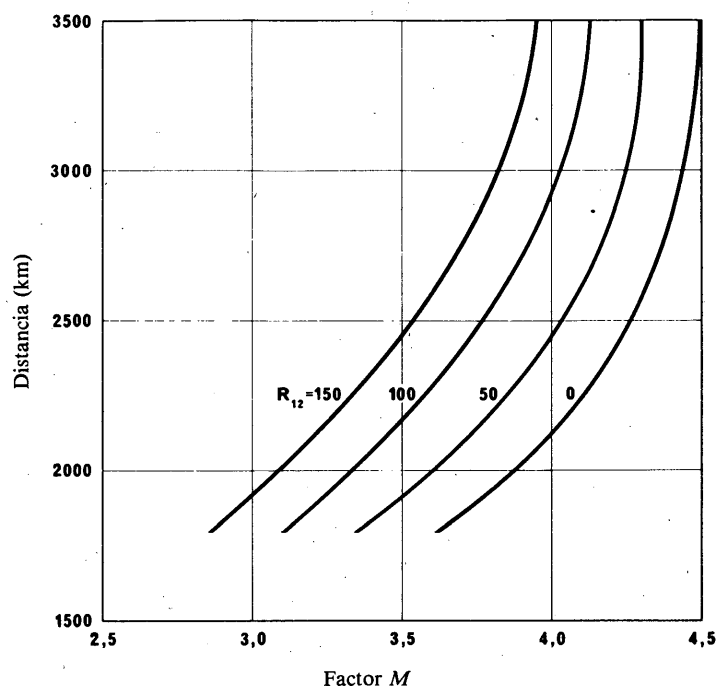


FIGURA 7 – Curvas del factor de distancia relativo a la capa F1

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, C. W. [1948] Critical frequencies, sunspots and sun's ultra violet radiation. *Terr. Magn. Atmos. Elect.*, **53**, 433-448.
- DAVIES, K. [1965] Ionospheric radio propagation. National Bureau of Standards Monograph 80, US Government Printing Office, Washington DC 20402.
- DUCHARME, E. D., PETRIE, L. E. y EYFRIG, R. [1973] A method for predicting the F1 layer critical frequency based on the Zurich smoothed sunspot number. *Radio Sci.*, Vol. 8, 837-839.
- HARNISCHMACHER, E. [1950] L'influence solaire sur la couche E normale de l'ionosphère. *C. R. Acad. Sci. (Paris)*, **230**, 1301.
- KERVIN, C. [1967] Non-Chapman-like behaviour of the F1 layer. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 27, 1299.
- LANGE-HESSE, G. [1959] Average diurnal variation of the critical frequencies of the F1 layer and their dependence on the geographic latitude and seasons. *Z. für Geophysik*, **25**, 199.
- MINNIS, C. M. [1955] A new index of solar activity based on ionospheric measurements. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **7**, 301.
- PETRIE, L. E. y STEVENS, E. E. [1965] An F1 layer MUF prediction system for northern latitudes. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-13, 542.
- PIGGOTT, W. R. y RAWER, K. [1972] *URSI Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction* (2nd Ed.). World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics. Report UAG-23, NOAA, Boulder, CO 80303, Estados Unidos de América. En LIARA (Argentina) existe una traducción en español de este texto, y en francés en el CNET (Francia).
- PIGGOTT, W. R. y RAWER, K. [1978] *URSI Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction* (2nd Ed.). Revision of chapters 1-4, World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics. Report UAG-23A, NOAA, Boulder, CO 80303, Estados Unidos de América.
- RATCLIFFE, J. A. y WEEKES, K. [1960] *Physics of the Upper Atmosphere*. Edited by J. A. Ratcliffe, Chapter 9, Academic Press, Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- SCOTT, J. C. W. [1952] The solar control of the E and F1 layers at high latitudes. *J. Geophys. Res.*, Vol. 57, 369.
- THEISSEN, E. [1953] Quelques résultats relatifs à la fréquence critique et au facteur de transmission de la couche ionosphérique F1. *C. R. Acad. Sci. (Paris)*, **A237**, 1104.

BIBLIOGRAFÍA

- PETRIE, L. E. [1968] Developments of HF predictions for the Arctic. Publicado en el *Ionospheric Radio Communications*, 263-271. Plenum Press, Nueva York, NY, Estados Unidos de América.

PARTE 5

COEFICIENTES NUMÉRICOS PARA foEs Y fbEs

Puede solicitarse al Director del CCIR un juego de coeficientes numéricos que definen las variaciones diurnas, geográficas y estacionales de los valores medianos y los decilos inferior y superior de foEs para un año de mínima actividad solar y un año de máxima actividad solar, así como un juego de coeficientes numéricos que dan las variaciones de los valores medianos y los decilos inferior y superior de fbEs (frecuencia de apantallamiento de la capa E esporádica) para un año de mínima actividad solar.

Las observaciones de la capa E esporádica efectuadas en 1965, 1967, 1969 y 1971 por 15 estaciones de sondeos verticales del hemisferio Norte, en latitudes templadas en Europa, Asia y Japón se han comparado con los valores de los decilos mediano y superior de foEs [Gosnell y Leftin, 1976]. En general, los valores de los decilos mediano y superior de foEs previstos son demasiado elevados. Los errores promedios de predicción de la foEs mediana se mantienen en $\pm 0,5$ MHz, pero para el decilo superior son algo mayores. La desviación típica de la predicción mediana se sitúa entre 0,3 y 0,75 MHz, y entre 0,6 y 1,8 MHz, para el decilo superior de foEs. El mayor error de predicción corresponde a la representación diurna. Durante las horas diurnas, el error de predicción de la foEs mediana se sitúa en el intervalo de $\pm 5\%$, y en el de $\pm 10\%$ para el decilo superior de foEs. En las horas nocturnas, el error de predicción de la foEs mediana se sitúa en el intervalo de $\pm (10 \text{ a } 35)\%$, y el error de predicción del decilo superior de foEs, en el intervalo de $\pm (15 \text{ a } 60)\%$.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GOSNELL, P. C. y LEFTIN, M. [1976] Analysis of occurrence of sporadic-E and accuracy of predictions of sporadic-E critical frequencies for temperate-latitude, northern-hemisphere stations. Office of Telecommunications. Report 76-89, US Department of Commerce, Boulder, CO 80303.

BIBLIOGRAFÍA

LEFTIN, M., OSTROW, S. M. y PRESTON, C. [1968] Numerical maps of foEs for solar cycle minimum and maximum. ESSA Tech. Report ERL 73-ITS 63, US Government Printing Office, Washington DC 20402.

LEFTIN, M., OSTROW, S. M. [1969] Numerical maps of fbEs for solar cycle minimum. ESSA Tech. Report ERL 124-ITS 87, US Government Printing Office, Washington DC 20402.

PARTE 6

COEFICIENTES NUMÉRICOS PARA EL PORCENTAJE DE APARICIÓN DE LA CAPA F DIFUSA

El porcentaje de aparición de la capa F difusa ha sido determinado a base de los datos ionosféricos obtenidos por la red mundial de estaciones de sondeos ionosféricos con incidencia vertical para un año de gran actividad solar y para un año de baja actividad solar [Davis, 1972]. Los valores han sido representados numéricamente por medio de la técnica cartográfica de Jones y otros [1969]. El Director del CCIR dispone de coeficientes numéricos para todos los meses.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DAVIS, R. M. [1972] The occurrence of spread-F and its effect on HF propagation. Office of Telecommunications. TRER 28, US Government Printing Office, Washington, DC 20402.

JONES, W. B., GRAHAM, R. P. y LEFTIN, M. [1969] Advances in ionospheric mapping by numerical methods. ESSA Tech. Report ERL 107-ITS 75, US Government Printing Office, Washington, DC 20402.

PARTE 7

COEFICIENTES NUMÉRICOS PARA $h'F$ Y $h'F, F_2$

Se han confeccionado para años de actividad solar máxima y mínima mapas numéricos de $h'F$, que es la altura virtual mínima observada de reflexión de las señales de incidencia vertical en la capa F (generalmente en la capa F_2 por la noche y en la capa F_1 durante el día). También se han confeccionado para los años de actividad solar máxima y mínima mapas numéricos de $h'F, F_2$ que es la altura virtual mínima observada de reflexión de las señales de incidencia vertical en la capa F_2 , tanto por la noche como durante el día [Leftin y otros, 1969]. Ambos juegos de coeficientes pueden solicitarse al Director del CCIR.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LEFTIN, M., OSTROW, S. M. y PRESTON, C. [1969] Numerical maps of monthly median $h'F, F_2$ for solar cycle minimum and maximum. ESSA Tech. Memo. IERTM-ITSA 69, US Department of Commerce, Boulder, CO 80303.

PARTE 8

MODELO DE DISTRIBUCIÓN VERTICAL DE LA DENSIDAD
ELECTRÓNICA EN LAS REGIONES E Y F

8.1 Introducción

Se ha preparado un modelo sencillo de la distribución vertical de la densidad electrónica en las regiones E y F. Los parámetros del modelo se han deducido de ecuaciones empíricas, relacionándolas con las características ionosféricas medidas normalmente, a saber, foE , foF_2 , $M(3000)F_2$ y $h'F$ o $h'F_2$, según cuál de estas dos sea la altura mínima virtual de reflexión en la capa F_2 . Como se conocen los valores predichos de estas características, el modelo puede construirse para cualquier lugar y hora. Se considera que el modelo tiene un valor práctico, tanto para predicciones de propagación como para investigaciones morfológicas de la ionosfera.

8.2 Detalles del modelo

La fig. 8 representa el modelo de Bradley y Dudeney [1973], que se compone de:

- una capa E parabólica situada por debajo de su altura de máxima densidad electrónica hmE , con un semiespesor ymE . hmE es constante (110 km), así como ymE (20 km);
- una capa F_2 parabólica con altura de máxima densidad electrónica hmF_2 y un semiespesor ymF_2 ;
- un aumento lineal de la densidad electrónica con la altura entre hmE y el punto de la capa F_2 parabólica en que la frecuencia del plasma f_j es 1,7 foE .

Los parámetros del modelo hmF_2 e ymF_2 se obtienen de las ecuaciones empíricas [Bradley y Dudeney, 1973; Bilitza y otros, 1979]:

$$hmF_2 = \frac{1490}{M(3000)F_2 + \Delta M} - 176 \quad (8.1a)$$

donde:

$$\Delta M = \frac{0,18}{x - 1,4} + \frac{0,096 (R_{12} - 25)}{150} \quad (8.1b)$$

siendo $x = \frac{fof_2}{foE}$ ó 1,7, tomándose el mayor de estos dos valores

y R_{12} = media móvil para doce meses del número de manchas solares R_I .

$$y_m F2 = h_m F2 - h' F, F2 + \Delta h' \quad (8.2a)$$

siendo:

$$\Delta h' = \left(\frac{0,613}{x - 1,33} \right)^{0,86} \cdot (h_m F2 - 104) \quad (8.2b)$$

$y_m F2$ tiene un valor mínimo de 35 km y un valor máximo correspondiente a $(h_m F2 - h_m E)$.

Para el caso especial en que $x = 1,7$ se considera que la concentración electrónica aumenta linealmente con la altura entre $h_m E$ y $h_m F2$:

es decir:

$$y_m F2 = 0 \text{ para } x = 1,7 \quad (8.3)$$

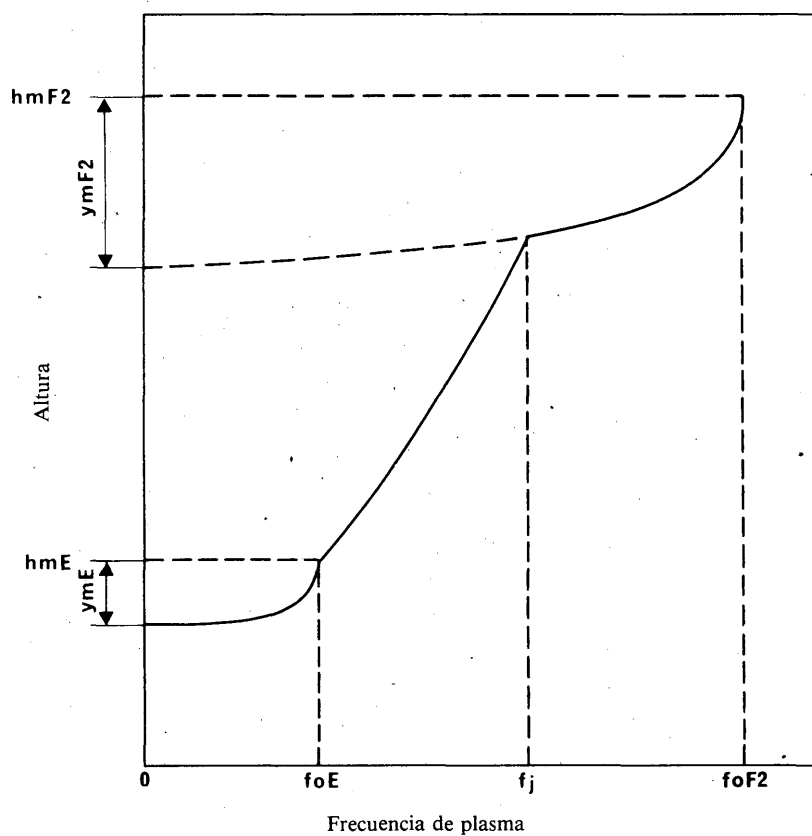


FIGURA 8 - El modelo Bradley-Dudeney

Este modelo consiste en:

- una capa E parabólica,
- un aumento lineal de la concentración electrónica con la altura en la región F1,
- una capa F2 parabólica.

Las escalas en ordenadas (altura) y en abscisas (frecuencia) son lineales.

8.3 Precisión del modelo

Comparaciones con análisis de altura real a partir de ionogramas muestra obtenidos en distintos puntos, horas del día, estaciones del año y periodos de actividad solar, confirman que las estimaciones del modelo basadas en los valores medidos de características ionosféricas de incidencia vertical para las alturas correspondientes a densidades electrónicas dadas, son generalmente correctas con un margen de precisión de 20 a 30 km.

8.4 Mapas de hmF2

La fig. 9 representa un ejemplo de mapa mundial de hmF2 deducido de la ecuación (8.1) y basado en los mapas numéricos de predicción de características ionosféricas. De forma análoga se pueden elaborar mapas de ymF2 utilizando las ecuaciones (8.1) y (8.2).

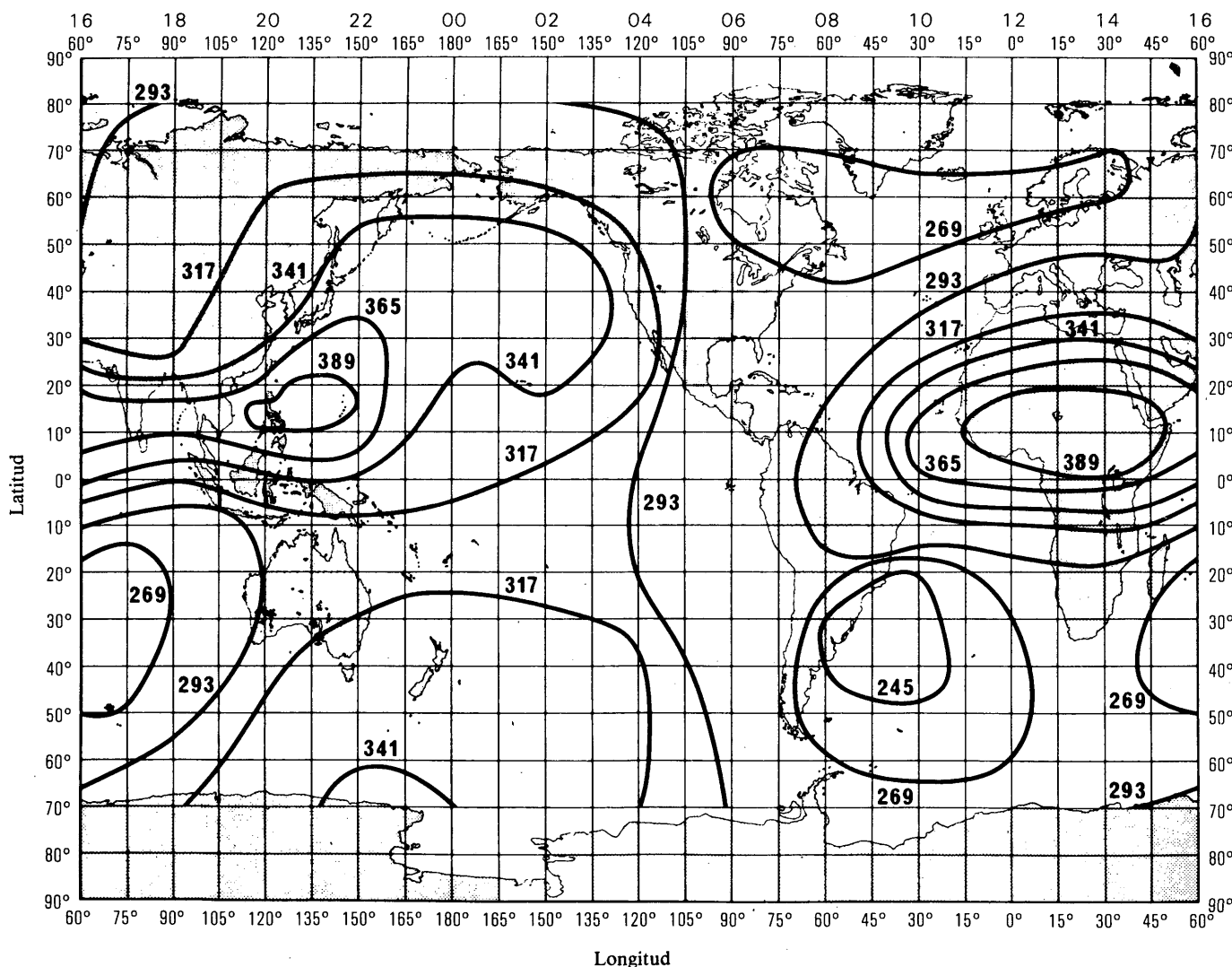


FIGURA 9 - hmF2 predicha para las 1200 h UTC, en junio, con $R_{12} = 100$
(Las alturas se indican en kilómetros)

8.5 Altura virtual y altura real de reflexión para la propagación con incidencia vertical del modelo

Existen expresiones analíticas para la altura virtual y la altura real de reflexión, h y h' respectivamente, para la propagación con incidencia vertical en este modelo. Para una frecuencia f expresada por:

$$f \leq f_oE \quad \text{con} \quad \frac{f}{f_oE} = x_E$$

$$h = hmE - ymE \sqrt{1 - x_E^2} \quad (8.4)$$

$$h' = (hmE - ymE) + x_E \cdot ymE \cdot \arg \operatorname{tgh} x_E \quad (8.5)$$

$$f_oE < f \leq f_j \quad \text{con} \quad \frac{f}{f_j} = x_j; x_E \geq 1$$

$$h = hmE + (h_j - hmE) \cdot \frac{x_j^2 \cdot (x_E^2 - 1)}{(x_E^2 - x_j^2)} \quad (8.6)$$

$$h' = (hmE - ymE) + x_E \cdot ymE \cdot \arg \operatorname{cotgh} x_E + 2(h_j - hmE) \cdot \frac{x_j^2 x_E \sqrt{x_E^2 - 1}}{(x_E^2 - x_j^2)} \quad (8.7)$$

$$f_j < f \leq f_oF2 \quad \text{con} \quad \frac{f}{f_oF2} = x_{F2}; x_E > 1; x_j > 1$$

$$h = hmF2 - ymF2 \sqrt{1 - x_{F2}^2} \quad (8.8)$$

$$h' = (hmE - ymE) + x_E \cdot ymE \cdot \arg \operatorname{cotgh} x_E + 2(h_j - hmE) \cdot \frac{x_j \cdot x_E [x_j \sqrt{x_E^2 - 1} - x_E \sqrt{x_j^2 - 1}]}{(x_E^2 - x_j^2)} +$$

$$x_{F2} \cdot ymF2 \cdot \arg \operatorname{sech} \left(\frac{hmF2 - h_j}{ymF2 \sqrt{1 - x_{F2}^2}} \right) \quad (8.9)$$

h_j es la altura de intersección de la parte lineal y de la curva F2 del modelo correspondiente a una frecuencia de plasma f_j , y viene dada por:

$$h_j = hmF2 - ymF2 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_j}{f_oF2} \right)^2} \quad (8.10)$$

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BILITZA, D., SHEIKH, Noor M. y EYFRIG, R. [1979] Modelo de la altura máxima de la capa F2 basado en los valores de M3000 de los mapas numéricos del CCIR. *Boletín de Telecomunicaciones*, Vol. 46, IX, 549.
- BRADLEY, P.A. y DUDENEY, J.R. [1973] A simple model of the vertical distribution of electron concentration in the ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 35, 2131-2146.

PARTE 9

**MÉTODO MANUAL PARA ESTIMAR LA MEDIANA MENSUAL DE LA FRECUENCIA
MÁXIMA UTILIZABLE (MUF) BÁSICA Y DE LA FRECUENCIA ÓPTIMA
DE TRABAJO PARA TRAYECTOS DE CUALQUIER LONGITUD**

9.1 Introducción

En esta parte se describe con todo detalle el procedimiento para utilizar los diagramas mundiales de contornos de MUF básica de la capa F2 de la parte 10, con objeto de determinar la mediana mensual de la MUF básica que se definen en la Recomendación 373. El método da por supuesto que la ionosfera es concéntrica respecto de la Tierra y que la propagación sigue un círculo máximo.

Tratándose de trayectos de transmisión de hasta 4000 km, generalmente se da por supuesto que la MUF básica corresponde al modo de 1 salto y que el punto de reflexión se sitúa a mitad del trayecto. A ese punto se le denomina «punto de control». Tratándose de trayectos de transmisión de más de 4000 km, normalmente hay múltiples reflexiones ionosféricas y por lo menos se necesitan dos puntos de control para calcular la MUF básica. Dichos puntos de control se eligen a lo largo del trayecto de círculo máximo, a 2000 km de cada extremo. Dado que con un método manual no sería factible considerar los efectos de la dispersión y de las inclinaciones ionosféricas, ni el ángulo grande o rayo de Pedersen, este método de dos puntos de control permite una aproximación conveniente en el caso de efectos ionosféricos que tiendan a aumentar la MUF de explotación.

Debido a la variabilidad de la capa F2, la distribución de los valores de la MUF básica en torno a la mediana mensual puede ser sustancial. A efectos de explotación, por consiguiente, se emplea a menudo la frecuencia óptima de trabajo (FOT), que puede aproximarse como el valor de la MUF básica que se rebasa en el 90% de los días del mes, a fin de calcular un límite superior de frecuencia que sea práctico en el caso de los circuitos de comunicación.

Para determinar la MUF básica de la capa F2, se utilizan los mapas mundiales de la F2(CERO)MUF y de la F2(4000)MUF que aparecen en las páginas 86 a 373 del Informe 340-4 (Ginebra, 1983), y que derivan de los coeficientes de Oslo. Para determinar la MUF en la capa E/F1, se utilizan los nomogramas que aparecen en las en las figs. 14 y 15 (véase la parte 3). Para todos los cálculos que exigen un índice solar, debe utilizarse el número suavizado de manchas solares R_{12} . En el caso exclusivo de la capa F2 la F2(CERO)MUF y la F2(4000)MUF no deben extrapolarse para valores de R_{12} superiores a 150. En el caso de esos valores de R_{12} , la MUF básica de la capa F2 no aumenta significativamente con un aumento del número suavizado de manchas solares.

En el punto 9.2 se determina la distancia de círculo máximo. El punto 9.3 se aplica a los trayectos de transmisión de menos de 4000 km; los procedimientos del punto 9.4 deben seguirse cuando los trayectos sean más largos. Se incluyen ejemplos que ilustran cada caso.

9.2 Determinación de la longitud del trayecto

En base al mapamundi (fig. 10) y el trazado de círculos máximos (fig. 11) se determina la longitud del trayecto como sigue:

- se coloca una hoja de papel transparente sobre el mapamundi (fig. 10) y se trazan la línea del ecuador y la línea del meridiano de Greenwich;
- se marcan las ubicaciones del transmisor y del receptor;
- se traslada la transparencia al trazado de círculos máximos (fig. 11). Se superponen los ecuadores y se desliza horizontalmente la transparencia hasta que las dos ubicaciones se hallan en el mismo círculo máximo, es decir, hasta que ambas se encuentren en la misma línea de trazo continuo o proporcionalmente distantes entre líneas de trazo continuo adyacentes. Se traza el trayecto de círculo máximo a lo largo de esa línea;
- sobre la base de las líneas de rayas y puntos (1000 km de separación) y de las líneas intermedias de puntos (500 km de separación), se estima la distancia de círculo máximo, D;
- si D es inferior a 4000 km, se pasa al punto 9.3. En caso contrario, pasese al punto 9.4.

9.3 Trayectos de transmisión de menos de 4000 km

La MUF básica en un trayecto de transmisión igual o inferior a 3400 km es la mayor de las MUF básicas correspondientes al modo E/F1 y al modo F2. Los trayectos entre 3400 y 4000 km determinan solamente el modo F2. La FOT en el circuito es la mayor de las FOT correspondiente a los modos F2 o E/F1. En determinadas circunstancias, la FOT puede no ser igual que la MUF básica para el mismo modo. Dado que las variaciones de un día a otro de la MUF básica correspondiente al modo E/F1 son despreciables, a efectos de la planificación a largo plazo cabe simplificar la FOT correspondiente a esas capas dando por supuesto que la FOT es igual a la MUF básica. De forma similar, el cálculo de la FOT puede simplificarse, en el caso de la capa F2, multiplicando la mediana mensual de la MUF básica por 0,85.

Seguidamente se enumeran las etapas de un cálculo manual de la MUF básica y de la FOT: (En el cuadro II se sugiere una posible tabulación de los datos. El ejemplo dado corresponde al trayecto entre Moscú (URSS) y Luechow (República Federal de Alemania) (distancia de círculo máximo = 1710 km).)

- Utilícese el mapamundi (fig. 10) para marcar en la transparencia la posición correspondiente a la mitad del trayecto, anotando la latitud y la longitud (55,1° N y 23,8° E en el caso del ejemplo).
- Se toman a continuación los diagramas titulados F2(CERO)MUF y F2(4000)MUF para $R_{12} = 0$ y 100 (por ejemplo, los correspondientes a julio, en las páginas 230 a 253 del Informe 340-4 (Ginebra, 1983). La transparencia se coloca sobre los cuatro diagramas para cada hora UTC de la columna (1), superponiendo los ecuadores y los meridianos de Greenwich. La frecuencia se lee en la posición correspondiente a la mitad del trayecto de la transparencia, siempre que sea posible hasta el MHz más próximo. Los valores de la MUF se inscriben en las columnas (2), (3), (5) y (6), según proceda.
- Se calcula la F2(CERO)MUF y la F2(4000)MUF para el número suavizado de manchas solares requerido, R_{12} , mediante la relación lineal siguiente, con objeto de interpolar/extrapolar los valores tabulados. Límitese R_{12} a un valor máximo de 150.

$$MUF = MUF_0 + 0,01 R_{12} (MUF_{100} - MUF_0) \quad (9.1)$$

Los valores se inscriben en las columnas (4) y (7), según proceda. Para la interpolación puede utilizarse también papel milimetrado lineal.

- Sobre la base del nomograma (fig. 12) con la MUF para R_{12} de las columnas (4) y (7) de la anterior etapa c), para la distancia de círculo máximo, D, se lee el valor de F2(D)MUF a partir de las escalas F2(CERO)MUF o F2(4000)MUF. El valor se anota en la columna (8).
- Se calcula el trayecto de la F2 FOT multiplicando la MUF, columna (8) por el factor 0,85 o utilizando la escala de conversión dada en la fig. 13. Se anota la F2(D)FOT en la columna (9).
- Se elige el diagrama del ángulo cenital solar para el mes requerido (por ejemplo, julio, en la página 383 del Informe 340-4 (Ginebra, 1983)). Colóquese la transparencia sobre el diagrama de modo que los ecuadores queden superpuestos. Colóquese la línea del meridiano de Greenwich en el tiempo local 00 del diagrama del ángulo cenital y, en la posición correspondiente a la mitad del trayecto, léase el ángulo cenital del Sol a las 0000 UTC. Repítase esta etapa para cada hora UTC e inscribase el ángulo cenital solar, χ , en la columna (10).
- Sobre la base del nomograma (fig. 14) para χ y R_{12} se lee el valor de la foE para cada hora UTC y se anota en la columna (11).
- Los resultados de la anterior etapa g) se convierten a E/F1(D)MUF para la distancia de círculo máximo, D, utilizando el nomograma que aparece en la fig. 15 y se anotan en la columna (12). Ese nomograma incluye un factor para la propagación en la capa F1 entre 2000 y 3400 km.
- La MUF básica correspondiente al trayecto de transmisión es la (D)MUF de las columnas (8) y (12) cuyo valor sea mayor. Anótese en la columna (13).
- La FOT correspondiente al trayecto es la F2 FOT de la columna (9) y los valores de la E/F1 MUF en la columna (12). Anótese en la columna (14).

Nota. — Se supone que la E/F1 FOT es equivalente a la E/F1 MUF básica.

9.4 Trayectos de transmisión a más de 4000 km

La MUF básica correspondiente al trayecto de transmisión se determina mediante el procedimiento de dos puntos de control. Sólo se considera el modo de propagación F2, puesto que la probabilidad de que un modo E determine la MUF en trayectos largos es tan pequeña que, a efectos de la planificación a largo plazo, resulta adecuada la consideración del modo F2 sólo. Para calcular la FOT, se multiplica la MUF correspondiente al modo F2 por un factor constante, fijado en 0,85. Dicho valor de la FOT se considera adecuado a efectos de la planificación a largo plazo. Seguidamente se enumeran las etapas del cálculo manual de la MUF y la FOT: (En el cuadro III se da un ejemplo de tabulación de los datos. Éstos corresponden al trayecto entre Kauai (Hawai) e Hiraïso (Japón) (distancia de círculo máximo = 5910 km).)

- Utilícese el trazado de círculos máximos de la fig. 11 para marcar la ubicación de los puntos de control correspondientes a la capa F2, A y B, a 2000 km de cada terminal. Se determinan y anotan la latitud y la longitud de cada punto de control correspondiente a la capa F2 utilizando el mapamundi de la fig. 10.

- b) Se toman a continuación los diagramas de la F2(4000)MUF para $R_{12} = 0$ y 100 (es decir, los correspondientes a enero, en las páginas 86 a 109 del Informe 340-4 (Ginebra, 1983)). Se coloca la transparencia sobre los diagramas que aparecen en la parte inferior de la página pertinente, para cada hora UTC de la columna (1), superponiendo los ecuadores y los meridianos de Greenwich. Léanse las frecuencias en los dos puntos de control correspondientes a la capa F2 de la columna (2). Esos valores de la MUF se inscriben en las columnas (3) y (4), según proceda.
- c) Se calcula la F2(4000)MUF para el número suavizado de manchas solares requeridos, R_{12} , mediante la relación lineal siguiente, con objeto de interpolar/extrapolar los valores tabulados. Límitese R_{12} a un valor máximo de 150.

$$\text{MUF} = \text{MUF}_0 + 0,01 R_{12} (\text{MUF}_{100} - \text{MUF}_0) \quad (9.2)$$

Los valores se anotan en la columna (5). Para la interpolación puede utilizarse también papel milimetrado lineal.

- d) La MUF correspondiente al trayecto es la MUF más pequeña de los dos puntos de control, A y B. Anótese la MUF correspondiente al trayecto en la columna (6).
- e) Para calcular la FOT correspondiente al trayecto, se multiplica la MUF básica del trayecto de la columna (6) por el factor 0,85, o se utiliza la escala de conversión que aparece en el margen derecho del nomograma de conversión de distancias dado en la fig. 13. Se anota la FOT del trayecto en la columna (7).

CUADRO II — Ejemplo de cálculo manual de la MUF básica y de la FOT en el caso de un trayecto de longitud inferior a 4000 km

Julio

$R_{12} = 40$

Distancia de círculo máximo = 1710 km

Moscú (URSS): 55,8° N-37,3° E

a Luechow (Rep. Fed. de Alemania): 53,0° N-11,2° E

Punto a mitad del trayecto: 55,1° N-23,8° E

UTC	F2(CERO)MUF			F2(4000)MUF			F2 (D) MUF	F2 (D) FOT	Ángulo cenital (grados)	foE	E/F1 (D) MUF	MUF Trayecto	FOT Trayecto
	$R_{12} = 0$	$R_{12} = 100$	$R_{12} = 40$	$R_{12} = 0$	$R_{12} = 100$	$R_{12} = 40$							
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
0000	3,7	5,9	4,6	10,3	16,2	12,7	8,4	7,1	101	0,95	4,7	8,4	7,1
0200	3,6	5,6	4,4	10,0	15,5	12,2	8,1	6,9	92	1,43	7,0	8,1	7,0
0400	4,4	6,1	5,1	13,0	17,0	14,6	9,6	8,2	77	2,44	12,0	12,0	12,0
0600	5,0	7,0	5,8	15,0	19,7	16,9	11,1	9,4	61	2,95	14,5	14,5	14,5
0800	5,3	7,2	6,1	15,8	20,3	17,6	11,6	9,9	45	3,24	15,9	15,9	15,9
1000	5,4	7,5	6,2	16,2	21,0	18,1	11,9	10,1	35	3,37	16,3	16,3	16,3
1200	5,1	7,2	5,9	15,5	20,5	17,5	11,5	9,8	39	3,32	16,0	16,0	16,0
1400	5,0	7,0	5,8	14,8	19,8	16,8	11,1	9,4	62	2,92	14,3	14,3	14,3
1600	5,0	7,0	5,8	15,5	20,6	17,5	11,5	9,8	69	2,73	13,3	13,3	13,3
1800	5,3	7,3	6,1	17,0	22,0	19,0	12,3	10,5	85	2,00	9,8	12,3	10,5
2000	5,4	7,3	6,2	17,0	21,5	18,8	12,2	10,4	96	1,19	5,8	12,2	10,4
2200	4,3	6,5	5,2	13,0	18,5	15,2	10,0	8,5	102	0,91	4,5	10,0	8,5

CUADRO III — Ejemplo de cálculo manual de la MUF básica y de la FOT en el caso de un trayecto de más de 4000 km

Enero

$R_{12} = 125$

Distancia de círculo máximo = 5910 km

Kauai (Hawái): 22,0° N-159,8° W

a Hiraíso (Japón): 36,4° N-140,6° E

Puntos de control: A: 30° N-178° W

B: 35° N-163° E

UTC	Punto de control	F2(4000)MUF			MUF Trayecto	FOT Trayecto
		$R_{12} = 0$	$R_{12} = 100$	$R_{12} = 125$		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
0000	A	27,5	36,5	38,8	37,9	32,2
	B	25,0	35,3	37,9		
0200	A	26,5	36,0	38,4	36,5	31,0
	B	25,5	34,3	36,5		
0400	A	22,0	33,8	36,8	35,5	30,2
	B	23,0	33,0	35,5		
0600	A	16,0	25,8	28,3	28,3	24,1
	B	18,2	29,8	32,7		
0800	A	11,8	20,5	22,7	22,7	19,3
	B	12,0	22,0	24,5		
1000	A	10,6	15,6	16,9	16,9	14,4
	B	10,9	16,0	17,3		
1200	A	11,5	13,5	14,0	12,6	10,7
	B	10,6	12,2	12,6		
1400	A	11,8	12,2	12,3	12,1	10,3
	B	10,7	11,8	12,1		
1600	A	9,2	9,9	10,1	10,1	8,6
	B	10,5	11,7	12,0		
1800	A	10,2	13,5	14,3	9,6	8,2
	B	9,0	9,5	9,6		
2000	A	21,0	33,0	36,0	17,8	15,1
	B	13,8	17,0	17,8		
2200	A	26,0	38,0	41,0	34,8	29,6
	B	21,0	32,0	34,8		

PARTE 10

**GRÁFICOS PARA ESTIMAR $F_2(\text{CERO})MUF$, $F_2(4000)MUF$
Y EL ÁNGULO CENITAL DEL SOL**

Los gráficos de $F_2(\text{CERO})MUF$, $F_2(4000)MUF$ y el ángulo cenital del Sol, figuran en el anexo (Informe 340-4 (Ginebra, 1983)), en las páginas siguientes.

Gráficos de $F_2(\text{CERO})MUF$ y $F_2(4000)MUF$

Mes	Tiempo universal (h)											
	0000	0200	0400	0600	0800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200
	Las páginas indicadas a continuación corresponden a $R_{12} = 0$; para $R_{12} = 100$, agregar 1 al número indicado.											
Enero	86	88	90	92	94	96	98	100	102	104	106	108
Febrero	110	112	114	116	118	120	122	124	126	128	130	132
Marzo	134	136	138	140	142	144	146	148	150	152	154	156
Abril	158	160	162	164	166	168	170	172	174	176	178	180
Mayo	182	184	186	188	190	192	194	196	198	200	202	204
Junio	206	208	210	212	214	216	218	220	222	224	226	228
Julio	230	232	234	236	238	240	242	244	246	248	250	252
Agosto	254	256	258	260	262	264	266	268	270	272	274	276
Septiembre	278	280	282	284	286	288	290	292	294	296	298	300
Octubre	302	304	306	308	310	312	314	316	318	320	322	324
Noviembre	326	328	330	332	334	336	338	340	342	344	346	348
Diciembre	350	352	354	356	358	360	362	364	366	368	370	372

	Página
Ángulo cenital del Sol, enero - febrero	377-378
marzo - abril	379-380
mayo - junio	381-382
julio - agosto	383-384
septiembre - octubre	385-386
noviembre - diciembre	387-388

PARTE 11

**MÉTODO POR COMPUTADOR PARA ESTIMAR
LA MUF MEDIANA BÁSICA MENSUAL
Y LA FRECUENCIA ÓPTIMA DE TRABAJO**

11.1 Introducción

La MUF básica mediana mensual y la frecuencia óptima de trabajo (FOT) se consideran cada una como el valor más elevado de la MUF básica y de la FOT para los modos de propagación adecuados a la longitud del trayecto que se está considerando. Los modos considerados son:

1F2	0-4000 km
modos de orden superior a F2	más de 4000 km
1F1	2000-3400 km
1E	0-2000 km
2E	2000-4000 km

11.2 Mapas de F2

Se dispone de dos juegos de coeficientes, un juego tridimensional con una dependencia lineal del ciclo solar y coeficientes para cada mes del calendario (los coeficientes de Oslo, 1966) y un juego de cinco dimensiones con una dependencia cuadrática del ciclo solar que permite centrar en cualquier día del año las predicciones medianas mensuales (coeficientes de Nueva Delhi, 1970). Se prefieren los coeficientes de Oslo de 1966 para evaluar la MUF básica.

Los mapas se establecen como una función de un parámetro de latitud que depende del campo magnético terrestre. También es preciso evaluar la girofrecuencia de los electrones f_H , proporcional a la intensidad del campo. Para la época de 1960 se utiliza un modelo de campo numérico.

11.3 Procedimientos de predicción de F2

11.3.1 Trayectos de 0 a 4000 km

La MUF básica de distancia CERO se obtiene mediante:

$$F2(\text{CERO})\text{MUF} = f_oF2 + f_H/2 \quad (11.1)$$

y la de 4000 km mediante:

$$F2(4000)\text{MUF} = 1,1 \times f_oF2 \times M(3000)F2 \quad (11.2)$$

Las predicciones para distancias entre 0 y 4000 km se obtienen interpolando entre $F2(\text{CERO})\text{MUF}$ y $F2(4000)\text{MUF}$ utilizando una relación de distancia que se obtiene de la fig. 12. Se utilizan las características ionosféricas para el punto medio del trayecto de círculo máximo.

11.3.2 Trayectos mayores de 4000 km

Los valores de $F2(4000)\text{MUF}$ están determinados para dos emplazamientos de puntos de control a 2000 km de cada extremo a lo largo del trayecto de círculo máximo que los une. La MUF del trayecto es el menor de estos dos valores.

11.3.3 Dependencia del ciclo solar

Cuando se utilizan los coeficientes de Oslo de 1966 se aplica el procedimiento del punto 2.4.2 para los números de manchas solares de 0 y 100. La MUF básica para el número requerido de manchas solares, R_{12} , se obtiene mediante interpolación o extrapolación lineal para valores situados entre 0 y 150. Cuando R_{12} excede 150, hay que utilizar el valor de 150.

11.4 Procedimiento de predicción de F1

El método para predecir la MUF básica de la capa F1 para distancias situadas entre 2000 y 3400 km se da en la parte 4. La latitud geomagnética y el ángulo cenital solar se determinan para el punto medio del trayecto de círculo máximo.

11.5 Procedimiento de predicción de E

El método para predecir la MUF básica de la capa E para distancias situadas entre 0 y 2000 km se da en la parte 3. Se utiliza la latitud y el ángulo cenital solar para el punto medio del trayecto de círculo máximo.

La $2E \text{ MUF}$, para distancias comprendidas entre 2000 y 4000 km, se toma como $E(2000)\text{MUF}$ expresada en términos de f_oE del punto medio del trayecto.

11.6 Predicciones de la frecuencia óptima de trabajo

La FOT para cada modo se estima, en términos de la correspondiente MUF básica, utilizando el factor de conversión F_i igual a 0,95 para los modos E y F1 como se indica en el cuadro I del Suplemento al Informe 252 para los modos F2. La FOT indicada es la mayor de las de los modos separados y puede algunas veces no corresponder al modo para el cual se ha tabulado la MUF.

11.7 Programa de computador

El programa de computador MUFFY contiene los procedimientos indicados anteriormente y puede obtenerse del Director del CCIR. Los datos de entrada comprenden las ubicaciones del transmisor y del receptor. El programa calcula el trayecto de círculo máximo. En el cuadro IV se da una muestra de los resultados. Como se ha indicado en la Resolución 63, se necesitan las cintas de datos 1 ó 3 para los coeficientes de Oslo o la cinta de datos 2 si se utilizan los coeficientes de Nueva Delhi.

CUADRO IV – Ejemplo de estimación por computador de la MUF básica y de la FOT

PROGRAM 'MUFFY' VERSION-JAN 82
 BASIC MUF AND FOT DETERMINATION IN ACCORDANCE WITH CCIR REPORT 340-4
 OSLO FOF2 COEFFICIENTS

			MARCH 1979		SUNSPOT NO. 125.0						
SYDNEY			TO ADELAIDE			AZIMUTHS			MILES		KM
33.92S	151.17E		34.92S	138.58E		260.95	88.09		720.5	1159.4	
SHORT PATH											
UT	MUF	FOT	UT	MUF	FOT	UT	MUF	FOT	UT	MUF	FOT
01	15.7	13.9	07	15.1	13.1	13	10.4	8.4	19	7.8	6.4
02	15.9	14.2	08	14.7	12.8	14	10.1	8.2	20	8.7	7.2
03	15.8	14.2	09	13.8	11.9	15	9.7	7.9	21	10.9	9.5
04	15.5	13.9	10	12.5	10.8	16	9.3	7.5	22	13.2	11.5
05	15.4	13.4	11	11.3	9.7	17	8.8	7.2	23	14.7	12.8
06	15.2	13.3	12	10.6	9.1	18	8.1	6.7	24	15.3	13.3

PARTE 12

ALTURA DE LA REFLEXIÓN ESPECULAR

Para una estimación simplificada de los trayectos oblicuos del rayo, puede suponerse que la reflexión tiene lugar en un espejo plano imaginario situado a la altura h_T , que figura en Lockwood [1984], como sigue:

$$h_T = 358 - (11 - 100a) \left(18,8 - \frac{320}{x^5} \right) + aD \left(0,03 + \frac{14}{x^4} \right) \quad \text{km} \quad (12.1)$$

o 500 km, tomándose el valor inferior, donde:

$$a = \frac{1}{M(3000)F_2} - 0,24, \text{ o } 0,04, \text{ tomándose el valor mayor;}$$

$$x = \frac{f_o F_2}{f_o E}, \text{ o } 2, \text{ tomándose el valor mayor;}$$

D : alcance medido sobre la superficie (km).

Para una relación frecuencia de la onda/MUF básica comprendida entre 0,80-0,95, y para alturas de hmF2 entre $250 < \text{hmF2} < 500$ km y $x > 2$, la ecuación (12.1) es exacta con un margen del 10%. Puede aplicarse la misma ecuación para frecuencias más bajas y valores inferiores de x , aunque con menor exactitud.

Las ecuaciones simplificadas que siguen son apropiadas para las condiciones nocturnas (ángulo cenital solar $\chi \geq 90^\circ$) y diurnas ($\chi < 90^\circ$), y se derivan de los valores obtenidos por la ecuación (12.1):

$$\text{Noche:} \quad h_T = \frac{1880}{M(3000)F_2} - 300 \quad \text{km} \quad (12.2)$$

$$\text{Día:} \quad h_T = 160 + (0,143D + 1800) \left\{ \frac{1}{M(3000)F_2} - 0,24 \right\} \quad \text{km} \quad (12.3)$$

Empleando la ecuación que convenga para $x > 3$, se evalúa h_T con un error inferior al 5%.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LOCKWOOD, M. [1984] Simplified estimation of raypath mirroring height for HF radiowaves reflected from the ionospheric F region. *Proc. IEE*, Vol. 131, parte F, 2, 117.

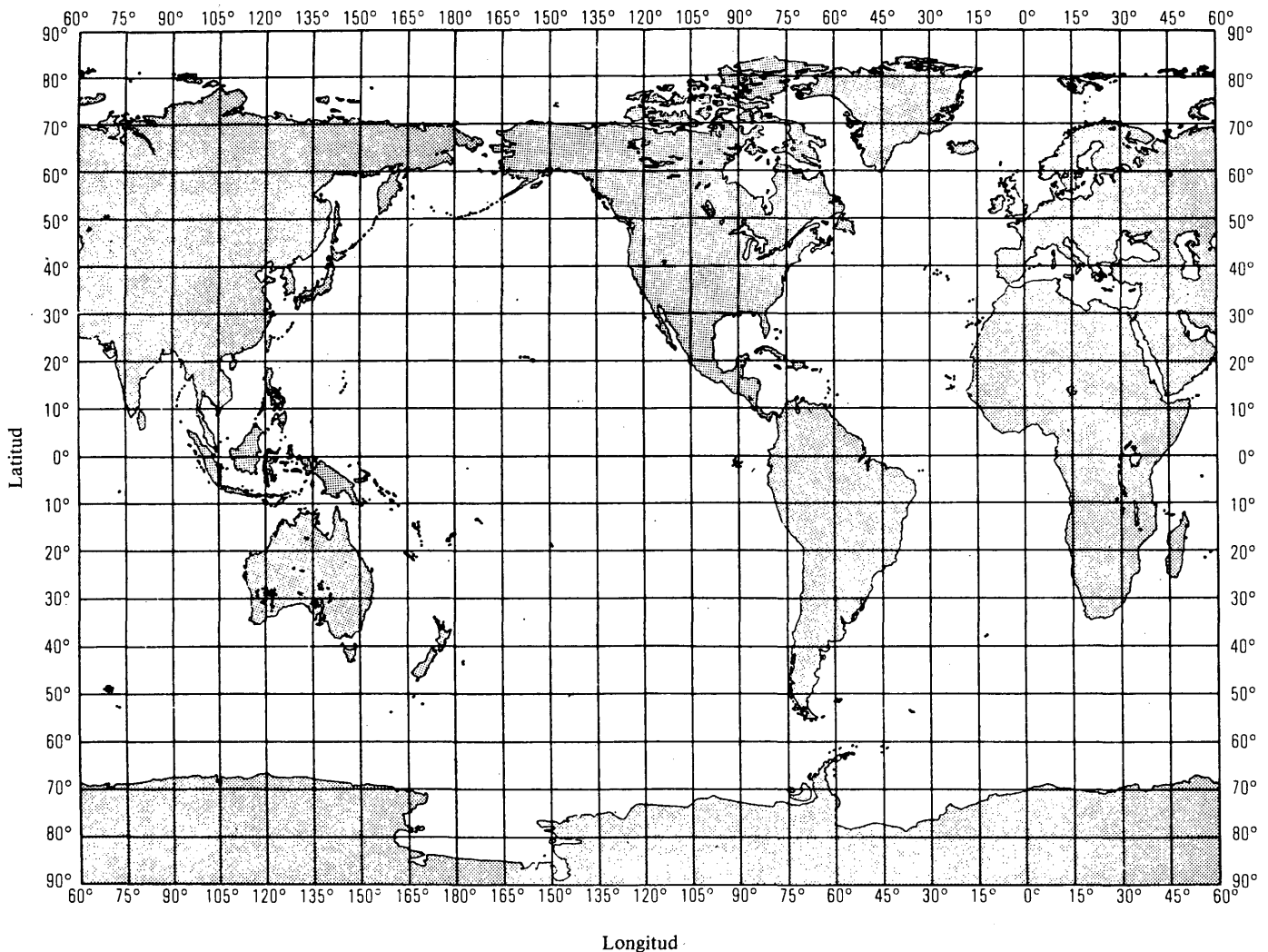


FIGURA 10 — Mapa del mundo en proyección cilíndrica modificada

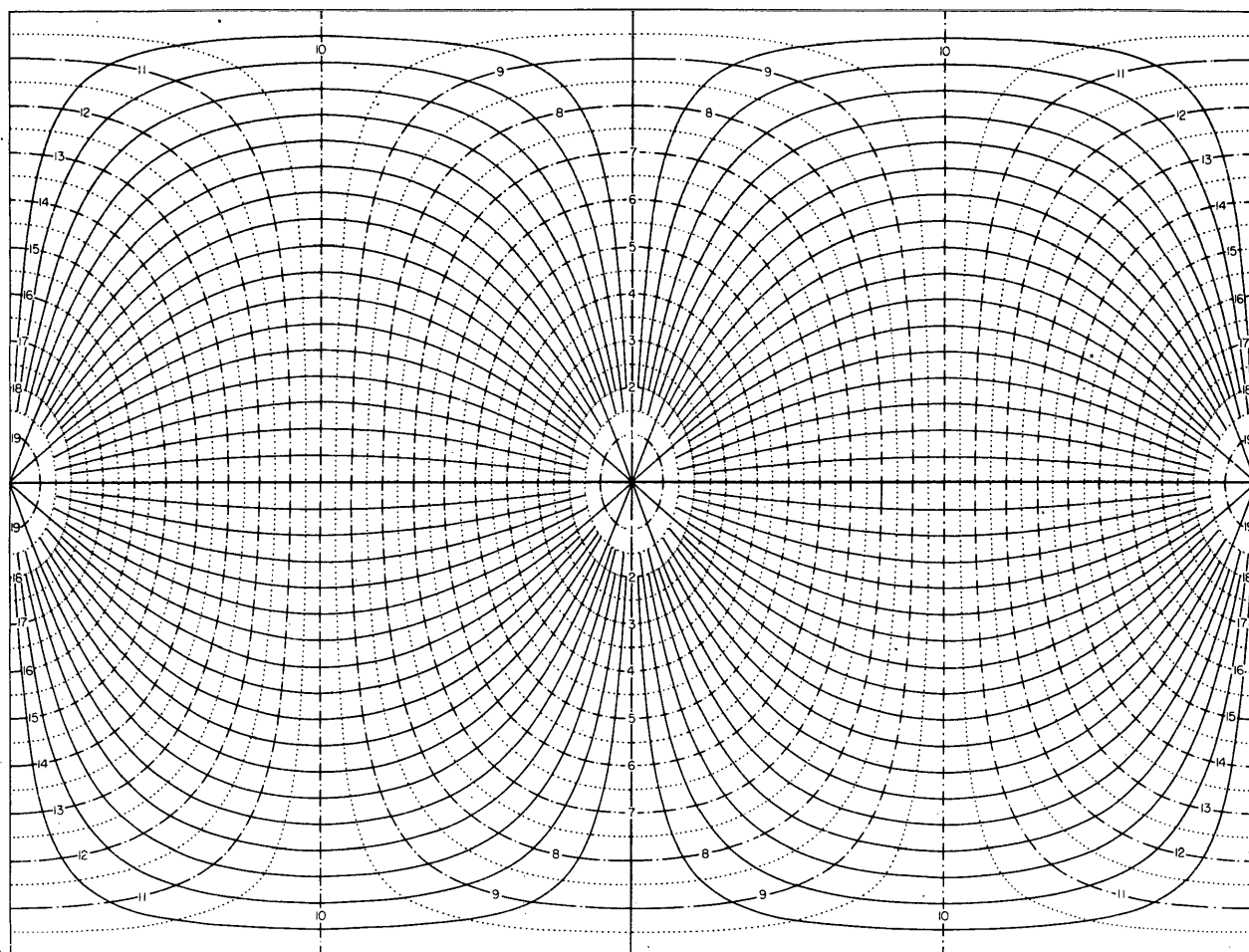


FIGURA 11 — *Trazado de círculos máximos con su centro en el Ecuador, para el mapa del mundo en proyección cilíndrica modificada*
 (Las líneas de trazo continuo representan círculos máximos y las líneas numeradas de trazo mixto indican las distancias en miles de kilómetros)

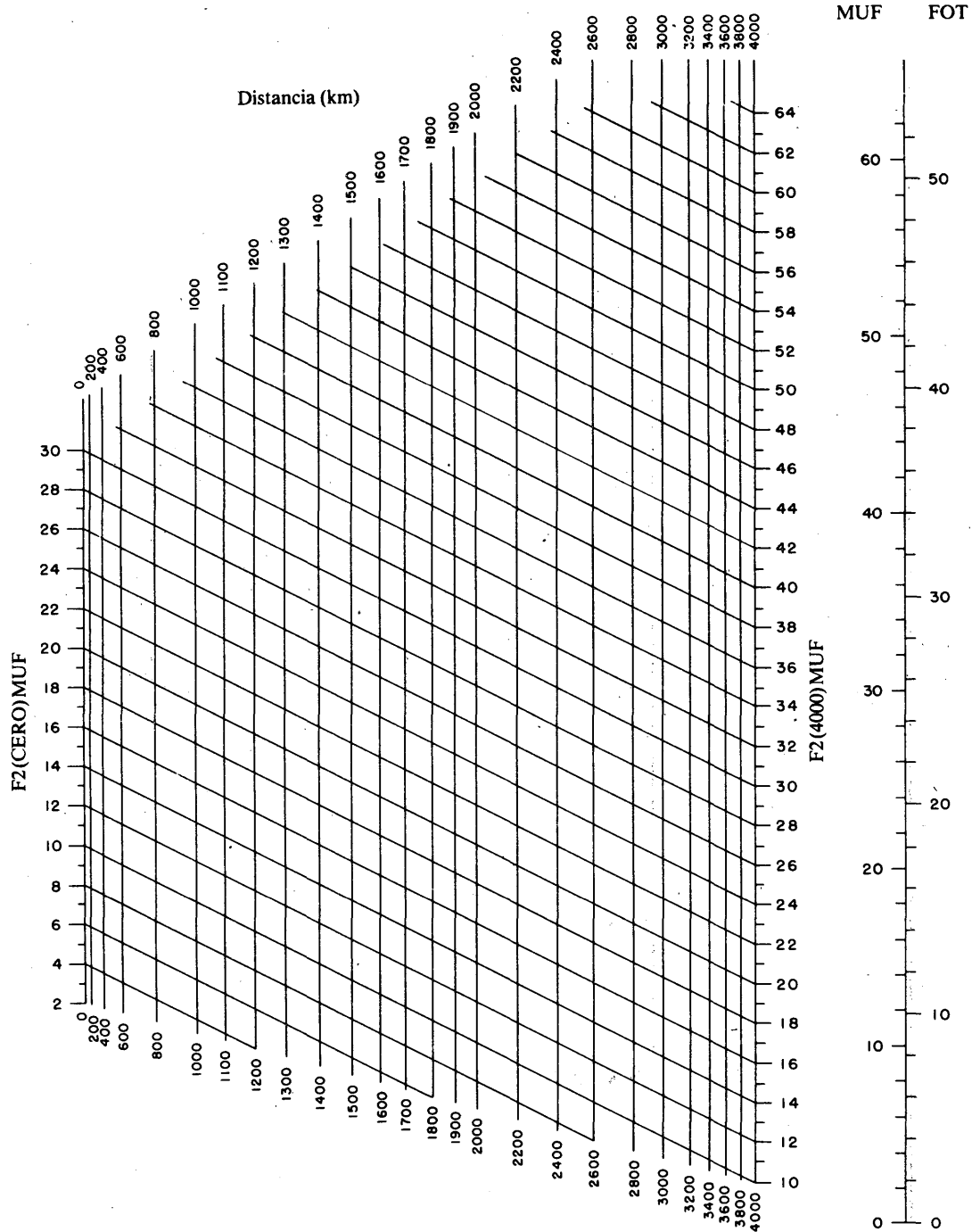


FIGURA 12 — Nomograma para transformar la $F2(CERO)MUF$ y la $F2(4000)MUF$ en MUF básicas equivalentes para las distancias intermedias de transmisión

FIGURA 13
Escala de conversión
para obtener la
frecuencia óptima
de trabajo (FOT)

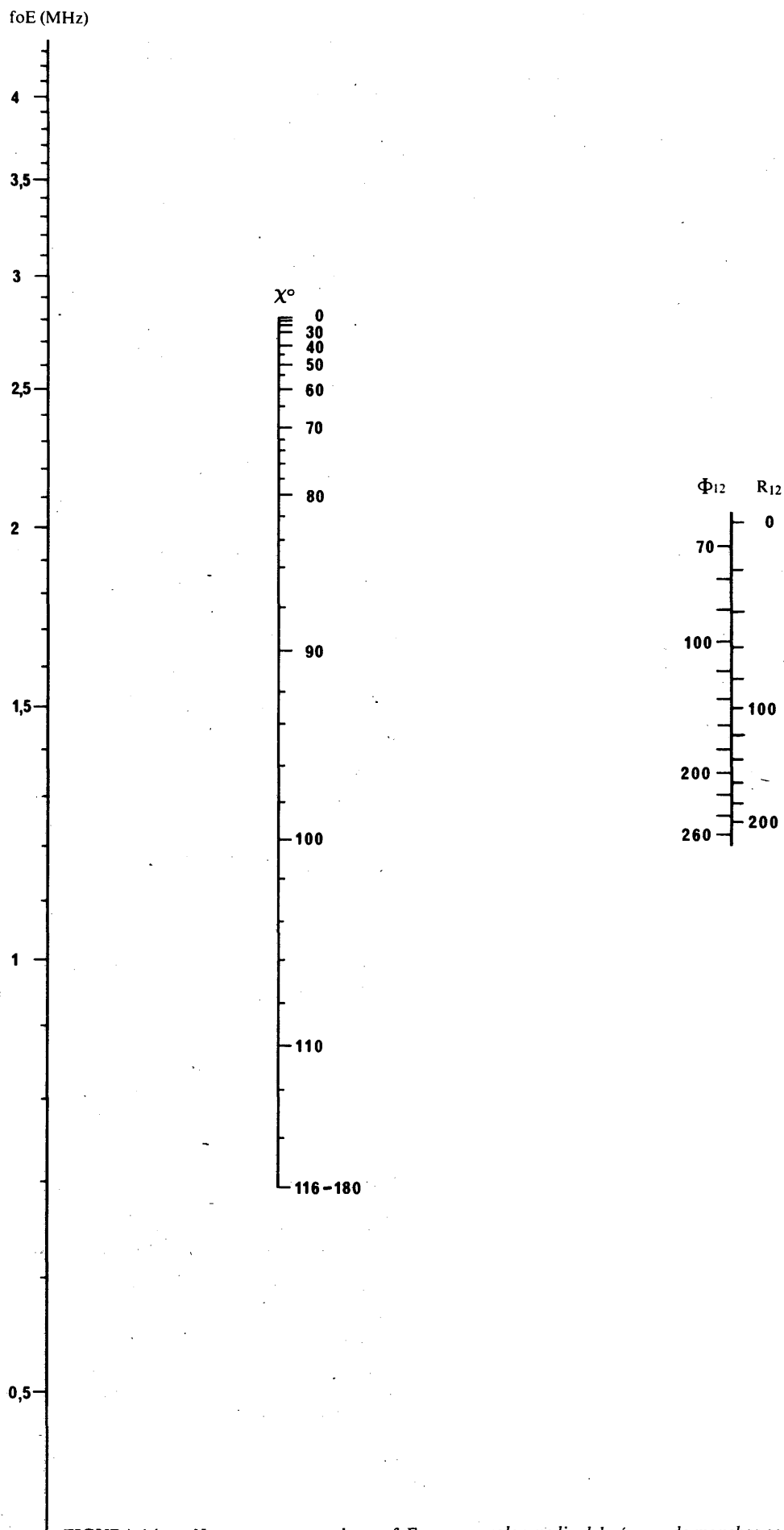


FIGURA 14 — Nomograma para obtener f_oE para un valor medio del número de manchas solares obtenido a lo largo de doce meses, R_{12} , o flujo radioeléctrico solar, Φ_{12} , y la distancia cenital del Sol χ

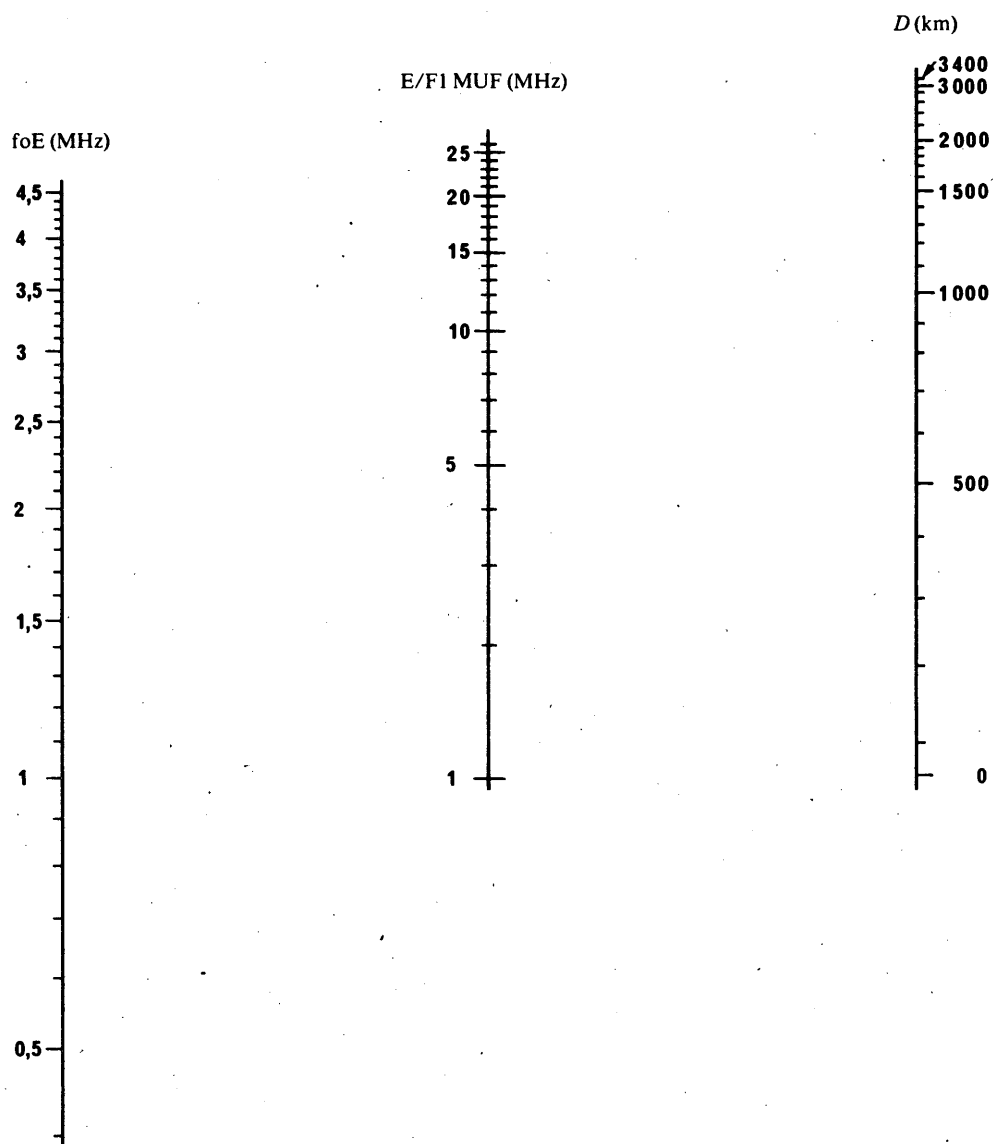


FIGURA 15 — Nomograma que permite transformar f_oE en $E/F1$ MUF básica a una distancia D

Imprimé en Suisse
Printed in Switzerland
Impreso en Suiza

ISBN 92-61-03037-8