

SECTION 5B: EFFETS DU SOL (Y COMPRIS LA PROPAGATION DE L'ONDE DE SOL)

RAPPORT 714-2

PROPAGATION DE L'ONDE DE SOL
DANS UNE ATMOSPHERE EXPONENTIELLE

(Question 3/5)

(1978-1982-1990)

1. Introduction

Dans les courbes antérieures de propagation de l'onde de sol, qui ont été remplacées par la Recommandation 368, on ne tenait pas compte de la réfraction troposphérique. La troposphère était assimilée au vide, de telle sorte que son indice de réfraction, n , et son indice de réfraction modifié, m , étaient:

$$n = 1, \quad m = n + \frac{h}{a} = 1 + \frac{h}{a} \quad (1)$$

où h est la hauteur et a le rayon de la Terre.

Dans l'Atlas des courbes de propagation de l'onde de sol pour les fréquences supérieures à 30 MHz [CCIR, 1955 et 1959], l'indice de réfraction troposphérique, considéré comme inversement proportionnel à la hauteur, a pour expression:

$$n = n_s - \frac{k-1}{k} \cdot \frac{h}{a}, \quad m = n_s + \frac{h}{ka} \quad (2)$$

où $n_s \approx 1,0003$ est la valeur de n à la surface de la Terre et k le facteur donnant le rayon terrestre équivalent, que l'on admet être égal aux 4/3 du rayon réel de la Terre dans les courbes susmentionnées. L'expression (2) se ramène à l'expression (1) quand $n_s = k = 1$.

En fait, l'indice de réfraction moyen de la troposphère varie exponentiellement avec la hauteur:

$$n = 1 + (n_s - 1) \exp(-h/h_s) \quad (3)$$

où $h_s (\approx 7 \text{ km})$ correspond à la hauteur de transition de la troposphère. Ce modèle a été entièrement décrit par Bean et Dutton [1966] et accepté comme atmosphère de référence dans la Recommandation 369. Pour $h \gg h_s$, il tend vers l'expression (1). Pour $h \ll h_s$, il tend vers l'expression (2), avec $h_s = ka(n_s - 1)/(k - 1)$.

Aux fréquences inférieures à 10 MHz, le gain de hauteur est faible pour des hauteurs moyennes, et c'est en partie pour cette raison que les courbes de propagation de l'onde de sol s'appliquent uniquement au cas où les deux points extrêmes sont situés au niveau du sol. En revanche, au-dessous de 3 MHz environ, la gamme des hauteurs qui entrent en ligne de compte pour déterminer le taux de variation de l'affaiblissement du champ en fonction de la distance à la surface de la Terre s'étend maintenant jusqu'à la région où l'indice de réfraction de la troposphère commence à s'écarte sensiblement de la valeur qui correspond à une variation inversement proportionnelle à la hauteur et justifie l'utilisation d'un rayon équivalent égal aux 4/3 du rayon terrestre. Il en résulte que le taux de variation de l'affaiblissement du champ en fonction de la distance à la surface de la Terre ne justifie plus l'emploi d'une atmosphère dans laquelle l'indice de réfraction est inversement proportionnel à cette distance jusqu'à des hauteurs illimitées.

Tandis qu'à 10 MHz (voir les courbes de propagation de l'onde de sol représentées dans la Recommandation 368), on a encore le droit pratiquement d'utiliser un rayon équivalent égal aux 4/3 du rayon réel pour les deux points extrêmes situés au niveau du sol, en revanche la troposphère peut avoir un effet extrêmement faible à la limite inférieure de 10 kHz, où la gamme des hauteurs qui entrent en ligne de compte pour la détermination du taux d'affaiblissement du champ en fonction de la distance s'étend à plusieurs kilomètres au-dessus de la Terre. —

Entre l'utilisation d'un rayon équivalent égal aux 4/3 du rayon terrestre pour 10 MHz et l'utilisation du rayon réel à 10 kHz, il y a donc une transition qui devient marquée vers 3 MHz et qui prend pratiquement fin à 10 kHz.

2. Analyse théorique

Au cours des dernières années, on a mis au point au Royaume-Uni [Rotheram, 1970] une méthode d'analyse qui tient compte des effets d'une troposphère dont l'indice de réfraction varie selon une loi exponentielle en fonction de la hauteur. Les paragraphes ci-après décrivent les méthodes utilisées pour calculer le champ dans différents domaines.

2.1 Champ près de la surface du sol à courte distance

Au voisinage de l'émetteur, le champ produit près de la surface du sol par une source se trouvant au sol répond à la théorie de la Terre plane de Sommerfeld. A mesure que la distance augmente, on peut appliquer des corrections pour tenir compte de la courbure réelle de la Terre, selon la méthode décrite [Bremmer, 1949]. D'autres corrections doivent être appliquées dans le cas d'une atmosphère exponentielle. La théorie de Sommerfeld élargie est utile jusqu'à des distances de l'ordre de $10 \lambda^{1/3}$ (km) et des hauteurs de l'ordre de $35 \lambda^{2/3}$ m, où λ est la longueur d'onde en mètres.

2.2 Région de visibilité directe

Dans la région de visibilité directe, le champ est produit par la somme de l'onde directe et de l'onde réfléchie, dont on représente les phases par des intégrales, en appliquant la méthode de la phase stationnaire, ce qui revient à opérer en optique géométrique. Ce cas diffère de celui de l'atmosphère linéaire en ce que les positions des points de phase stationnaire et les intégrales sont à évaluer numériquement.

2.3 Région de diffraction

La région de diffraction se situe à des distances supérieures à environ $10 \lambda^{1/3}$ (km) (voir le § 2.1) au voisinage de la surface du sol ou au-delà de l'horizon radioélectrique pour des installations terminales surélevées. Dans ce cas, le champ peut être représenté par la série des résidus ou par la série des modes de guide d'ondes. A chaque mode sont associées une valeur propre — la constante de propagation — et une fonction propre — la fonction gain de hauteur. La constante de propagation détermine la variation du mode en fonction de la distance. La fonction gain de hauteur détermine la variation du mode en fonction de la hauteur. La fonction propre est la solution d'une équation différentielle ordinaire du second ordre; on obtient la valeur propre en imposant les conditions aux limites. Il existe une infinité de modes mais seuls quelques-uns sont nécessaires. On utilise jusqu'à neuf modes. On applique une méthode exacte d'aplanissement de la Terre: la transformation de Langer [1937]. Pour les modèles représentés par les expressions (1) et (2) ci-dessus, les solutions sont connues sous la forme analytique de fonctions d'Airy. Pour le modèle exponentiel, les solutions ne peuvent pas être exprimées par des fonctions générales. Les approximations WKB, fonctions intégrales d'Airy [Bremmer, 1960 et 1962] sont utilisées pour donner des approximations initiales des valeurs propres. On intègre ensuite numériquement l'équation différentielle de Riccati (impédance d'onde ou coefficient de réflexion de l'onde) et la valeur propre se détermine par la méthode de Newton. On trouve enfin la fonction gain de hauteur par intégration numérique.

2.4 Différences de propagation dans des atmosphères linéaires et exponentielles

Dans certaines conditions, la valeur du champ de l'onde de sol ne dépend pas du modèle de profil de réfraction utilisé. Dans d'autres conditions, les résultats relatifs à un profil linéaire et ceux relatifs à un profil exponentiel peuvent accuser une différence de plus de 20 dB. Dans certains cas, les calculs plus simples relatifs à un profil linéaire [Kirby et Hughes, 1989] peuvent être ajustés pour se rapprocher étroitement des résultats du profil exponentiel.

Lorsque les deux installations terminales sont au voisinage de la surface c'est-à-dire lorsqu'elles sont à une altitude inférieure à $5f^{-2/3}$ km pour une fréquence de f MHz [Millington, 1958], les deux profils fournissent la même valeur de champ sauf pour des distances supérieures à 200 km environ. A 100 MHz la différence des champs calculés est d'environ 1 dB à 500 km. Cette différence augmente avec la longueur d'onde. On a montré [Rotheram, 1981] que, même à ces grandes longueurs d'onde, on peut faire concorder les calculs de profil linéaire avec les calculs de profil exponentiel, aux grandes distances, en ajustant le facteur donnant le rayon équivalent de la Terre à une valeur inférieure à la valeur nominale de 4/3. La valeur appropriée de ce rayon équivalent de la Terre modifié dépend de la longueur d'onde et, dans une moindre mesure, de la valeur de la conductivité du sol. Sa valeur varie entre la valeur nominale de 4/3 à 30 MHz et s'approche asymptotiquement de l'unité à 10 kHz [Rotheram, 1970, Gerks, 1971].

Lorsque l'une ou les deux installations terminales sont à une grande hauteur, l'approximation du profil linéaire ne convient pas. Le profil linéaire surestime à la fois le champ et la distance entre une installation terminale et l'horizon radio-électrique. Pour une antenne située à une hauteur de 10 km, l'erreur dans l'estimation de la distance à l'horizon radioélectrique est d'environ 11 km [Millington, 1958]. Si les valeurs du champ en fonction de la distance sont calculées avec les deux profils, on constate que l'on peut faire concorder les résultats de profil linéaire avec ceux de profil exponentiel, aux grandes distances, en décalant la courbe du profil linéaire d'une quantité égale à la différence des distances des horizons radioélectriques.

3. Programme d'ordinateur

Un programme GRWAVE _____ a été mis au point à l'aide des méthodes décrites plus haut [Rotheram, 1981]. Les données d'entrée sont les constantes n_s et h_s de l'expression (3), les constantes du sol, la fréquence radioélectrique et les caractéristiques de polarisation. _____ Le champ se calcule pour toutes les paires de hauteurs des antennes. Il suffit évidemment, pour chaque mode, d'avoir une seule valeur propre et de faire une seule intégration de l'équation différentielle donnant la fonction gain de hauteur. On introduit plusieurs codes pour commander le mode de fonctionnement et la quantité de données à sortir. La donnée de sortie principale est le champ en chaque point. Elle est exprimée en $\mu\text{V}/\text{m}$ pour un émetteur dont le doublet a un moment de $5 \lambda/2 \pi (\text{A} \cdot \text{m})$ et qui produit un champ de $1,5 \times 10^5 \mu\text{V}/\text{m}$ à 1 km, c'est-à-dire le champ en espace libre d'une antenne isotrope rayonnant $3/4 \text{ kW}$, (ce qui correspond à $1,732 \times 10^5 \mu\text{V}/\text{m}$ à 1 km pour une antenne isotrope rayonnant 1 kW). On obtient aussi à la sortie l'affaiblissement de transmission et le champ par rapport à son niveau espace libre. Des renseignements sur la structure des lobes d'interférence sont également fournis pour la région à visibilité directe. En utilisant un code, on peut obtenir d'autres renseignements, notamment les caractéristiques de propagation et les fonctions gain de hauteur, ou des données analytiques très poussées qui permettent le diagnostic des erreurs.

Note. — Le Secrétariat du CCIR tient ce programme à la disposition des administrations; si les paramètres appropriés lui sont communiqués, le service de l'ordinateur de l'UIT pourra faire les calculs nécessaires.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BEAN, B. R. et DUTTON, E. J. [1966] *Radio Meteorology*, Dover Publications Inc., New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.
- BREMNER, H. [1949] *Terrestrial Radio Waves*. Elsevier, Londres, Royaume-Uni.
- BREMNER, H. [1960 et 1962] On the theory of wave propagation through a concentrically stratified troposphere with a smooth profile. Part I: Discussion of the extended WKB approximation. *NBS J. Res.*, **64D**, 467 (1960). Part II: Expansion of the rigorous solution. *Ibid.*, **66D**, 31 (1962).
- CCIR [1955] Atlas des courbes de propagation de l'onde de sol pour les fréquences comprises entre 30 et 300 Mc/s. UIT, Genève.
- CCIR [1959] Atlas des courbes de propagation de l'onde de sol pour les fréquences comprises entre 30 et 10 000 Mc/s. UIT, Genève.
- GERKS, I. H. [juillet 1971] Computing the effects of tropospheric refraction at frequencies below 10 megahertz. *Radio Sci.*, Vol. 6, 7, 681-687.
- KIRBY, R.C. et HUGHES, K.A. [1989] *Electronic Engineers Handbook*, édité par D.G. Fink et D. Christiansen, 3ème édition, McGraw-Hill, New York, para. 18-76.
- LANGER, R. E. [1937] On the correction formulas and the solutions of the wave equations. *Phys. Rev.*, Vol. 51, 669-676.
- MILLINGTON, G. [octobre-décembre 1958] Propagation at great heights in the atmosphere. *Marconi Rev.*, Vol. XXI, 131, 143-160, 4^e trimestre.
- ROTHERAM, S. [décembre 1970] Ground-wave propagation at medium and low frequencies. *Electron. Lett.*, Vol. 6, 25, 794.
- ROTHERAM, S. [octobre 1981] Ground-wave propagation; Part I, Theory for short distances; Part II, Theory for medium and long distances, and reference propagation curves. *Proc. IEE*, Part F, Vol. 128, 5, 275-285.

