|  |  |
| --- | --- |
| **Assemblée des radiocommunications (AR-15) Genève, 26-30 octobre 2015** |  |
| **UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS** |  |
|  |  |
| Source: Document 3/92(Rév.1)  Objet: Question UIT-R 201-5/3 | **Document 3/1005-F** |
| **7 septembre 2015** |
|  |

|  |
| --- |
| Commission d'études 3 des radiocommunications |
| PROJET DE RÉVISION DE LA RECOMMANDATION UIT-R P.834‑6 |
| Effets de la réfraction troposphérique sur la propagation  des ondes radioélectriques |
|  |

Introduction

La Commission d'études 3 propose une révision de la Recommandation UIT-R [P.834-6](http://www.itu.int/rec/R-REC-P.834/fr) concernant la prévision de la longueur effective du trajet, également définie comme étant la différence de longueur de trajet due aux effets troposphériques, sur les trajets Terre-espace.

Résumé des modifications

Dans le titre du paragraphe 6 de l'Annexe 1, l'expression «longueur effective du trajet» est remplacée par «différence de longueur du trajet», pour refléter le texte de la Recommandation, et quelques modifications de forme sont apportées dans ce paragraphe.

Le modèle correspondant à la formule (22) figurant pages 7 et 8 est mis à jour afin d'inclure:

– un nouveau coefficient de coïndice (k2);

– des fonctions de mappage distinctes;

– une correction du terme sec, qui devient le terme hydrostatique;

– une correction de la constante gravitationnelle dans la formule (23e);

– des paramètres du modèle qui font partie intégrante de la Recommandation;

– la définition de la procédure d'interpolation à utiliser dans le plan horizontal et dans la direction verticale.

Mots clés

Différence de longueur de trajet due aux effets troposphériques, liaison Terre-espace, systèmes mondiaux de navigation par satellite (GNSS), produit météorologique numérique, cartes numériques.

PROJET DE RÉVISION DE LA RECOMMANDATION UIT-R P.834-6

Effets de la réfraction troposphérique sur la propagation  
des ondes radioélectriques

(Question UIT-R 201/3)

(1992-1994-1997-1999-2003-2005-2007)

…

Annexe 1

…

# 6 Différence de longueur du trajet radioélectrique et variations associées

Etant donné que l'indice de réfraction troposphérique est supérieur à 1 et dépend de l'altitude, la longueur du trajet radioélectrique d'une onde se propageant entre le sol et un satellite est supérieure à la longueur du trajet géométrique. La différence de longueur est donnée par la formule suivante:

 (15)

où:

*s* : abscisse curviligne le long du trajet

*n* : indice de réfraction

*A* et *B* : extrémités du trajet.

On ne peut utiliser l'équation (15) que si la variation de l'indice de réfraction *n* le long du trajet est connue.

Lorsque la température *T*, la pression atmosphérique *P* et l'humidité relative *H* au niveau du sol sont connues, on peut calculer la différence de longueur de trajet *L* selon la méthode semi-empirique expliquée ci-après, méthode qui a été établie à partir des courbes obtenues par radiosondage atmosphérique au cours d'une campagne de mesures d'un an effectuées dans 500 stations météorologiques en 1979. Dans cette méthode, l'expression générale de la différence de la longueur de trajet *L* est la suivante:

 (16)

où:

0 : angle d'élévation au point d'observation

*LV* : différence de longueur de trajet verticale

*k* et  (0, *LV*) : paramètres correctifs pour le calcul desquels on utilise le modèle atmos­phérique exponentiel.

Le facteur *k* intègre la variation de l'angle d'élévation le long du trajet. Le paramètre  (0, *LV*) exprime les effets de la réfraction (le trajet n'est pas une ligne droite). Il est toujours très petit, sauf pour des angles d'élévation très faibles, et il est négligé dans le calcul; il induit une erreur de 3,5 cm seulement pour un angle 0 de 10 et de 0,1 mm pour un angle 0 de 45. On notera par ailleurs qu'à des angles d'élévation très petits pour lesquels le paramètre  ne serait pas négligeable, l'hypothèse d'une atmosphère plane en couches, qui constitue la base de toutes les méthodes de calcul de la différence de longueur de trajet, n'est plus valable.

La différence de longueur de trajet verticale (m) est donnée par la formule suivante:

*LV*  0,00227 *P*  *f* (*T*) *H* (17)

Dans le premier terme de la partie droite de l'équation (17), *P* est la pression atmosphérique (hPa) au point d'observation.

Dans le second terme à caractère empirique, *H* est l'humidité relative (%); la fonction de la température *f*(*T*), qui dépend des coordonnées géographiques, est donnée par la formule suivante:

*f* (*T*)  *a* 10*bT* (18)

où:

*T* est exprimé en C

*a* est exprimé en m/% d'humidité relative

*b* est exprimé en C–1.

Les paramètres *a* et *b*, qui sont fonction des coordonnées géographiques, sont donnés dans le Tableau 2.

TABLEAU 2

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Coordonnées géographiques | *a* (m/%) | *b* (C–1) |
| Zones côtières (îles ou lieux situés à moins de 10 km de la côte) | 5,5  10–4 | 2,91  10–2 |
| Zones équatoriales non côtières | 6,5  10–4 | 2,73  10–2 |
| Toutes les autres zones | 7,3  10–4 | 2,35  10–2 |

Pour calculer le facteur correctif *k* de l'équation (16), on suppose une variation exponentielle du coïndice de réfraction atmosphérique *N* en fonction de l'altitude *h*:

*N*(*h*)  *Ns* exp (– *h* / *h*0) (19)

où *Ns* est la valeur moyenne du coïndice de réfraction à la surface de la Terre (voir la Recommandation UIT-R P.453) et *h*0 est donné par la formule suivante:

 (20)

*k* est ensuite calculé à partir de l'expression suivante:

 (21)

où *ns* et *n*(*h*0) sont respectivement les valeurs de l'indice de réfraction à la surface de la Terre et à une altitude *h*0 (donnée par l'équation (20)) et *rs* et *r*(*h*0) sont les distances correspondantes par rapport au centre de la Terre.

Pour les trajets Terre-espaceavec des angles d'élévation θ, la différence de longueur due aux effets troposphériques, *L*(), (m), peut s'exprimer comme la somme d'un terme hydrostatique et d'un terme humide, *LH*() *et* *LW*().

La différence de longueur d'un trajet dans la direction verticale, *LHv* et *LWv,* peut être projetée à un angle d'élévation **supérieur à 3°, en utilisant deux fonctions de mappage distinctes pour les composantes hydrostatique et humide, *mH*(**) et *mW*(**):



 m (22)

La composante hydrostatique verticale à la surface de la Terre, *LHvs*, peut être obtenue à l'aide de la formule suivante:

 m (22a)

La composante humide verticale à la surface de la Terre, *LWvs*, peut être obtenue à l'aide de la formule suivante:

 m (22b)

où:

*ps*, *es*: pression totale de l'air et pression partielle de la vapeur d'eau à la surface de la Terre (hPa)

*Tms*: température moyenne de la colonne de vapeur d'eau au-dessus de la surface (K)

λ: facteur de décroissance de la pression de la vapeur

*Rd*: *R*/*Md* = 287,0 (J/kg K)

*R*: constante des gaz parfaits = 8,314 (J/mol K)

*Md*: masse molaire de l'air sec = 28,9644 (g/mol)

*k*1: 77,604 (K/hPa)

*k*2: 373 900 (K2/hPa)

*gms* = *gm*(*hs*)

*gm*(*h*)= 9,784 (1 – 0,00266 cos(2 *lat*) – 0,00028 *h*)

= accélération due à la pesanteur au centre de la masse d'air à partir de l'altitude *h* (m/s2)

*lat*: latitude de l'emplacement (radians)

*hs*: altitude de la surface de la Terre au‑dessus du niveau moyen de la mer (km).

Pour les récepteurs situés à une altitude *h* (km), différente de l'altitude *hs*, les composantes hydrostatique et humide verticales, *LHv*(*h*) *et* *LWv*(*h*), sont données par les formules suivantes:

 m (23a)

 m (23b)

où:

On peut déduire les valeurs des paramètres météorologiques d'entrée à l'altitude *h* (*Tm*(*h*), *e*(*h*) et *p*(*h*)) des valeurs à la surface de la Terre (*Tms*, *es* et *ps*), à l'aide des formules suivantes:

                m (23a)

 K (24a)

 hPa (24b)

 hPa (24c)

où:

α*m*: taux de variation de la température moyenne de la vapeur d'eau à partir de la surface de la Terre (K/km).

*Ts* = température de l'air à la surface de la Terre (K) = 

α = taux de variation de la température de l'air (K/km)  

 = *Rd* /1000 = 0,287                J/(g K)

*g* = accélération due à la pesanteur à la surface de la Terre [m/s2] = 

      K/km (23e)

= *Rd* /1 000 = 0,287 J/g K (23f)

 K (23g)

On peut obtenir tous les paramètres d'entrée du modèle (*ps*, *es*, *Tms*, λ et α*m*) en supposant que les paramètres météorologiques se caractérisent par la variation saisonnière.

 (25)

où:

*Xi* : *ps*, *es*, *Tms*, λ ou α*m*Indice *i*: 1 désigne *ps,* 2 désigne *es*, 3 désigne *Tms*, 4 désigne λ, 5 désigne αm *a*1*i* : valeur moyenne du paramètre

*a*2*i* : variation saisonnière du paramètre

*a*3*i* : jour correspondant à la valeur minimale du paramètre

*Dy* :jour de l'année (1, 2, ..., 365,25),

1 = 1er janvier, 32 = 1er février, 60,25 = 1er mars.

Les coefficients *a*1, *a*2 et *a*3 des paramètres *ps*, *es*, *Tms*, λ, et α*m*, et l'altitude du niveau de référence (*href*)à laquelle ces coefficients ont été calculés font partie intégrante de la présente Recommandation et sont fournis sous la forme de cartes numériques dans le fichier R-RECP.834-7-201504-I!!ZIP-E.

Les valeurs sont données entre 0° et 360° en longitude et entre +90° et –90° en latitude, avec une résolution de 1,5° en latitude et en longitude. On peut obtenir la différence de longueur du trajet à tout emplacement voulu et à toute altitude *h* au-dessus de la surface, à l'aide de la méthode suivante:

a) Déterminer, à partir des cartes, les coefficients *a*1i, *a*2i et *a*3i des cinq paramètres, *ps*, *es*, *Tms*, λ et α*m*, et l'altitude de référence *href*, aux quatre points de la grille les plus proches de l'emplacement voulu.

b) Calculer la valeur des cinq paramètres, *ps*, *es*, *Tms*, λ et α*m*, à l'altitude de référence *href* pour le jour de l'année *D*y (, ,  et ) aux quatre points de la grille les plus proches, à l'aide de la formule 25, avec les coefficients *a*1i, *a*2i et *a*3i pour chaque point de la grille.

c) Calculer les valeurs des trois paramètres, *p*(*h*), *e*(*h*) et *Tm*(*h*), à l'altitude *h* aux quatre points de la grille les plus proches, à l'aide des formules (24a), (24b) et (24c), avec les valeurs de , ,  et  et les valeurs de *href* pour chaque point de la grille.

d) Calculer les valeurs de *LHv*(*h*) et *LWv*(*h*), à l'altitude *h* aux quatre points de la grille les plus proches de l'emplacement voulu, à l'aide des formules (23a) et (23b), avec les valeurs de *p*(*h*), *e*(*h*) et *Tm*(*h*) pour chaque point de la grille.

e) Calculer les valeurs de *LHv*(*h*) et *LWv*(*h*), à l'altitude *h*  et à l'emplacement voulu, par interpolation bilinéaire des quatre valeurs de *LHv*(*h*) et *LWv*(*h*), aux quatre points de la grille, comme décrit dans la Recommandation UIT-R P.1144.

f) Calculer la valeur de la différence de longueur du trajet due aux effets troposphériques à l'altitude *h*  et à l'emplacement voulu (*L*(*h,*)), à l'aide de formule 22.

On a testé la précision du modèle proposé au moyen de mesures radiométriques et de mesures effectuées par radiosonde ou par des systèmes GNSS, afin de déterminer la valeur de *L*vs, et l'incertitude se situe entre 2 et 6 cm dans le monde. Pour obtenir une plus grande précision, on peut utiliser comme données à introduire dans le modèle d'autres mesures locales de la pression totale de l'air et de la pression de la vapeur d'eau.

Les fonctions de mappage des composantes hydrostatique et humide, *mh*() et *mw*(), sont données par:

                 (26a)

                 (26b)

où:



*b*h = 0,0029

*b*w = 0,00146

*c*w = 0,04391

  (26c)

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Hémisphère** | **c1** | **c10** | **c11** | **ψ** |
| Nord | 0,062 | 0,001 | 0,005 | 0 |
| Sud | 0,062 | 0,002 | 0,007 | π |

 (26d)

 (26e)

Les coefficients *A*0*h, A*1*h, A*2*h, B*1*h, B*2*h, A*0*w, A*1*w, A*2*w, B*1*w* et *B*2*w* font partie intégrante de la présente Recommandation et sont fournis sous la forme de cartes numériques dans le fichier R‑RECP.834-7-201504-I!!ZIP-E.ZIP. On peut calculer les valeurs des paramètres *ah* et *aw* à l'emplacement voulu par interpolation bilinéaire des quatre valeurs de ces coefficients aux quatre points de la grille, comme décrit dans la Recommandation UIT-R P.1144.



Dans le cas d'une liaison Terre-espace avec des angles d'élévation θ supérieurs à 20°, une approximation des fonctions de mappage définies par les formules (26a) et (26b) est donnée par:

                 (26f)

Pour appliquer ce modèle, il est recommandé d'utiliser systématiquement pour tous les angles d'élévation, soit les formules (26a) et (26b), soit la formule (26f).

Figure 1

Cartes représentant la différence moyenne de temps de propagation   
sur le trajet au niveau de référence en janvier et en juillet



# 7 Propagation par conduits

Il y a conduits chaque fois que le gradient vertical du coïndice de réfraction à une altitude et un lieu donnés est inférieur à –157 N/km.

La présence de conduits est importante parce qu'ils peuvent donner lieu à une propagation radioélectrique anormale, en particulier sur des liaisons de Terre ou des liaisons Terre-espace avec un angle d'élévation très faible. Les conduits constituent un phénomène selon lequel des signaux radioélectriques de fréquence suffisamment élevée se propagent bien au‑delà de leur distance de visibilité directe normale, d'où des risques de brouillage pour d'autres services (voir la Recommandation UIT-R P.452). Ils jouent par ailleurs un rôle important dans les phénomènes de brouillage par trajets multiples (voir la Recommandation UIT-R P.530) même si leur présence ne suffit pas ou n'est pas nécessaire pour que l'on observe des phénomènes de propagation par trajets multiples sur une liaison particulière.

## 7.1 Influence de l'angle d'élévation

Lorsqu'une antenne d'émission est située à l'intérieur d'un conduit radioélectrique à couches horizontales, les rayons émis à des angles d'élévation très faibles peuvent être «piégés» à l'intérieur du conduit. Dans le cas simplifié d'un profil de réfractivité «normal» au-dessus d'un conduit de surface ayant un gradient de réfractivité constant, l'angle d'élévation critique  (rad) pour que des rayons soient piégés est donné par l'expression:

 (27)

où d*M*/d*h* est le gradient vertical du module de réfraction  et *h* est l'épaisseur du conduit qui correspond à la hauteur du sommet du conduit au-dessus de l'antenne d'émission.

La Fig. 2 donne l'angle d'élévation maximal pour que des rayons soient piégés dans le conduit. L'angle de piégeage maximal augmente rapidement à mesure que les gradients de réfractivité passent en dessous de –157 N/km (c'est-à-dire lorsque les taux de variation augmentent) ou lorsque l'épaisseur du conduit augmente.

## 7.2 Fréquence de piégeage minimale

La présence d'un conduit même s'il est bien situé, ne signifie pas nécessairement que l'énergie sera efficacement couplée dans le conduit de façon à ce qu'il y ait propagation sur de longues distances. Outre le fait qu'elle doit respecter la condition d'un angle d'élévation maximal, la fréquence de l'onde doit être supérieure à une valeur critique déterminée par la profondeur physique du conduit et par le profil de réfractivité. En dessous de cette fréquence de piégeage minimale, il y aura fuites d'énergie à travers les parois du conduit.

Il est possible d'évaluer la fréquence minimale pour qu'une onde soit piégée dans un conduit troposphérique en utilisant une intégrale de phase. La Fig. 3 indique la fréquence de piégeage minimale pour des conduits de surface (courbes en traits pleins) où l'on suppose un gradient du coïndice de réfraction constant négatif entre la surface et une altitude donnée, avec un profil standard au-dessus de cette altitude. Pour les fréquences utilisées avec les systèmes de Terre (en général comprises entre 8 et 16 GHz) le conduit doit avoir une épaisseur minimale de 5 à 15 m environ et la fréquence de piégeage minimale, *fmin*, dépend fortement de l'épaisseur du conduit et du gradient de l'indice de réfraction.

Dans le cas de conduits surélevés, un autre paramètre intervient, même pour le cas simple d'un profil linéaire du coïndice de réfraction. Ce paramètre tient compte de la forme du profil de l'indice de réfraction au-dessous du gradient du conduit. Les courbes en tirets de la Fig. 3 indiquent la fréquence de piégeage minimale pour un conduit à gradient constant situé au‑dessus d'une couche de surface ayant un gradient du coïndice de réfraction standard d'au moins – 40 N/km.

figure 2

Angle maximal de piégeage pour un conduit de surface ayant un gradient  
du coïndice de réfraction constant au-dessus d'une Terre sphérique



Pour des couches ayant des taux de variation très légèrement supérieurs au minimum requis pour qu'il y ait propagation par conduit, la fréquence de piégeage minimale est en fait supérieure à celle que l'on observe dans le cas d'un conduit de surface. Pour des gradients de conduit très importants, pour qu'il y ait piégeage dans un conduit surélevé, il faut une couche beaucoup plus fine que dans le cas d'un conduit de surface de gradient équivalent pour une fréquence donnée.

figure 3

Fréquence minimale de piégeage dans des conduits radioélectriques atmosphériques  
pour des gradients du coïndice de réfraction constants



\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_