

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R P.528-5
(09/2021)

**Méthode de prévision de la propagation
dans les bandes d'ondes métriques,
décimétriques et centimétriques
pour le service mobile aéronautique et
le service de radionavigation aéronautique**

Série P
Propagation des ondes radioélectriques

Avant-propos

Le rôle du Secteur des radiocommunications est d'assurer l'utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique du spectre radioélectrique par tous les services de radiocommunication, y compris les services par satellite, et de procéder à des études pour toutes les gammes de fréquences, à partir desquelles les Recommandations seront élaborées et adoptées.

Les fonctions réglementaires et politiques du Secteur des radiocommunications sont remplies par les Conférences mondiales et régionales des radiocommunications et par les Assemblées des radiocommunications assistées par les Commissions d'études.

Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

La politique de l'UIT-R en matière de droits de propriété intellectuelle est décrite dans la «Politique commune de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI en matière de brevets», dont il est question dans la Résolution UIT-R 1. Les formulaires que les titulaires de brevets doivent utiliser pour soumettre les déclarations de brevet et d'octroi de licence sont accessibles à l'adresse <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/fr>, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en œuvre de la politique commune en matière de brevets de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI et la base de données en matière de brevets de l'UIT-R.

Séries des Recommandations UIT-R

(Également disponible en ligne: <http://www.itu.int/publ/R-REC/fr>)

Séries	Titre
BO	Diffusion par satellite
BR	Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision
BS	Service de radiodiffusion sonore
BT	Service de radiodiffusion télévisuelle
F	Service fixe
M	Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés
P	Propagation des ondes radioélectriques
RA	Radio astronomie
RS	Systèmes de télédétection
S	Service fixe par satellite
SA	Applications spatiales et météorologie
SF	Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe
SM	Gestion du spectre
SNG	Reportage d'actualités par satellite
TF	Émissions de fréquences étalon et de signaux horaires
V	Vocabulaire et sujets associés

Note: Cette Recommandation UIT-R a été approuvée en anglais aux termes de la procédure détaillée dans la Résolution UIT-R 1.

Publication électronique
Genève, 2022

© UIT 2022

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'UIT.

RECOMMANDATION UIT-R P.528-5*,**

Méthode de prévision de la propagation dans les bandes d'ondes métriques, décimétriques et centimétriques pour le service mobile aéronautique et le service de radionavigation aéronautique

(Question UIT-R 203/3)

(1978-1982-1986-2012-2019-2021)

Domaine d'application

La présente Recommandation porte sur une méthode de prévision de l'affaiblissement de transmission de référence dans la gamme de fréquences 100 MHz – 30 GHz pour les services aéronautiques. Cette méthode, qui procède par étapes, permet de calculer l'affaiblissement de transmission de référence. Les seules données requises dans le cadre de cette méthode sont la distance entre les antennes, la hauteur des antennes au-dessus du niveau moyen de la mer, la fréquence, la polarisation et le pourcentage de temps.

La présente Recommandation présente en outre la manière de calculer le rapport de protection prévu ou le rapport signal utile/signal brouilleur à l'entrée du récepteur dépassé pendant au moins 95% du temps, $R(95)$. À cette fin, il faut disposer des données supplémentaires suivantes à l'égard du signal utile et du signal brouilleur: puissance émise, gain de l'antenne d'émission et gain de l'antenne de réception.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) qu'il est nécessaire de proposer des directives aux ingénieurs en matière de planification des services de radiocommunication dans les bandes d'ondes métriques, décimétriques et centimétriques;
- b) que le modèle de propagation présenté dans l'Annexe 2 est fondé sur un volume considérable de données expérimentales (voir Annexe 1);
- c) que le service aéronautique, ayant souvent pour fonction d'assurer la sécurité de la vie humaine, nécessite de ce fait un niveau de disponibilité plus élevé que de nombreux autres services;
- d) que ce service devrait être disponible pendant 95% du temps pour être plus fiable,

recommande

1 d'employer le logiciel complet présenté dans cette Recommandation pour produire des valeurs et des courbes concernant l'affaiblissement de transmission de référence pour la hauteur des terminaux, les fréquences et les pourcentages de temps les plus probables dans les services aéronautiques;

2 que les Notes suivantes soient considérées comme une partie intégrante de la présente Recommandation.

NOTE 1 – Il convient de souligner que les valeurs produites sont fondées sur des données essentiellement recueillies sous un climat continental tempéré.

* Cette Recommandation est portée à l'attention de la Commission d'études 5.

** La Commission d'études 3 des radiocommunications a apporté des modifications rédactionnelles à cette Recommandation en 2022 conformément aux dispositions de la Résolution UIT-R 1.

NOTE 2 – La présente méthode permet d'établir l'affaiblissement de transmission de référence, c'est-à-dire l'affaiblissement entre deux antennes isotropes théoriques sans perte. Lorsqu'on atténue les trajets multiples de la réfraction du sol, au niveau de la station au sol ou des installations, en utilisant des contrepoids ou un diagramme de rayonnement vertical pour une antenne directive, l'analyse doit comprendre des diagrammes de rayonnement d'antenne adaptés.

Annexe 1

Élaboration et application du modèle

Des méthodes de prévision de l'affaiblissement de transmission ont été élaborées pour déterminer l'affaiblissement de transmission de référence pendant 1 à 99% du temps pour des hauteurs d'antenne applicables aux services aéronautiques. Elles reposent sur un volume considérable de données expérimentales qui ont été minutieusement comparées aux prévisions. Aux fins de ces calculs, nous sommes fondés sur l'hypothèse d'une Terre régulière (paramètre de terrain $\Delta h = 0$) et d'une atmosphère de référence moyenne annuelle pour le monde entier. Le modèle atmosphérique est fondé sur une stratification horizontale exponentielle de l'atmosphère à travers laquelle le tracé du rayon est réalisé en tenant compte de la courbure du rayon due à la variation de l'indice de réfraction. Nous avons également utilisé des constantes correspondant à un sol moyen, à des antennes isotropes et à des statistiques d'évanouissements à long terme pour un climat continental tempéré. Si ces paramètres peuvent être considérés comme raisonnables ou comme le scénario le plus défavorable dans de nombreux cas, les valeurs calculées doivent être employées avec prudence lorsque les conditions réelles sont très différentes de nos hypothèses.

À l'exception d'une zone «voisine» de l'horizon radioélectrique, nous avons obtenu des valeurs médianes de l'affaiblissement de transmission de référence pour des trajets «en-deçà de l'horizon» en ajoutant l'affaiblissement dû à l'absorption atmosphérique (en décibels) à l'affaiblissement de transmission correspondant aux conditions d'espace libre. Pour la zone «voisine» de l'horizon radioélectrique, nous avons calculé les valeurs de l'affaiblissement de transmission selon les lois de l'optique géométrique pour tenir compte du brouillage entre le rayon direct et un rayon réfléchi par la surface de la Terre.

Nous n'avons pas fait un usage exclusif du modèle de brouillage à deux rayons pour les calculs des valeurs médianes en-deçà de l'horizon, car la structure lobée qui en résulte sur des trajets courts dépend beaucoup des caractéristiques de la surface du sol (irrégularité et constantes électriques), des conditions atmosphériques (le rayon équivalent de la Terre varie dans le temps) et des caractéristiques de l'antenne (polarisation, orientation et diagramme de gain). Les courbes ainsi obtenues seraient souvent plus trompeuses qu'utiles, car les détails de la structure lobée dépendent dans une large mesure de paramètres qu'il est difficile de déterminer avec une précision suffisante. Néanmoins, la structure lobée est examinée du point de vue statistique dans le calcul de variabilité.

Pour les disponibilités dans le temps autres que 50%, les valeurs de l'affaiblissement de transmission de référence produites par l'utilisateur, L_b , ne présentent pas toujours une croissance monotone en fonction de la distance. En effet, les changements dus à la variabilité sur la distance peuvent parfois l'emporter sur les changements du niveau médian. La variabilité peut être alimentée aussi bien par des variations de la médiane horaire ou des évanouissements de puissance à long terme que par des

évanouissements dus à un brouillage de phase à l'échelle horaire ou à court terme. L'évanouissement à court terme tient compte à la fois de la réfraction du sol et de la propagation troposphérique par trajets multiples. Les statistiques d'évanouissements de puissance à long terme sont fondées sur une grande quantité de données empiriques recueillies sur de longues périodes et pour des emplacements et des géométries de liaisons variés.

Les valeurs de l'affaiblissement de transmission de référence $L_b(5)$ peuvent servir à évaluer les valeurs de L_b pour un signal brouilleur dépassé pendant 95% du temps (100%-5%). Les valeurs de $L_b(50)$ permettent d'évaluer les conditions de propagation médianes (50%). Les valeurs de $L_b(95)$ peuvent être utilisées pour évaluer la limite de portée de service d'un signal utile qui serait disponible pendant 95% du temps en l'absence de brouillage.

Le rapport de protection prévu ou le rapport signal utile/signal brouilleur à l'entrée du récepteur dépassé pendant au moins 95% du temps, $R(95)$, peut être évalué de la manière suivante:

$$R(95) = R(50) + Y_R(95) \quad (1)$$

$$R(50) = [P_t + G_t + G_r - L_b(50)]_{\text{utile}} - [P_t + G_t + G_r - L_b(50)]_{\text{brouilleur}} \quad (2)$$

et

$$Y_R = -\sqrt{[L_b(95) - L_b(50)]_{\text{utile}}^2 + [L_b(5) - L_b(50)]_{\text{brouilleur}}^2} \quad (3)$$

Dans l'équation (2), P_t est la puissance émise et G_t et G_r sont les gains isotropes des antennes d'émission et de réception exprimés en dB.

Il est facile d'ajouter à l'équation (3) d'autres variables, par exemple le gain d'antenne, lorsque leur variabilité peut être déterminée. L'utilisation continue (100%) ou simultanée des voies étant implicite dans la relation $R(95)$ ci-dessus, les conséquences d'un fonctionnement intermittent de l'émetteur doivent être examinées séparément.

Le logiciel complet permettant de produire des valeurs et des courbes d'affaiblissement de transmission de référence est joint avec sa documentation dans le fichier zip supplémentaire intitulé [R-REC-P.528-5-202109-1!!ZIP-E.zip](#). En outre, un certain nombre de valeurs concernant l'affaiblissement de transmission de référence sont disponibles sous forme de tableaux dans le fichier zip supplémentaire.

Annexe 2

Méthode par étapes

La présente Annexe repose sur la convention selon laquelle les variables décrivant le terminal bas seront représentées par l'indice «1» (par exemple la hauteur h_{r1} du terminal bas) tandis que les variables correspondant au terminal haut seront représentées par l'indice «2» (par exemple la hauteur h_{r2} du terminal haut). En outre, la lettre de base de certaines variables indique la référence utilisée:

- d , distance le long du grand cercle mesurée à la surface de la Terre;
- r , longueur parcourue par un rayon entre deux points de l'espace;

- h , hauteur mesurée au-dessus du niveau moyen de la mer;
- z , rayon mesuré depuis le centre de la Terre.

Pour les besoins de la présente Recommandation, le rayon moyen de la Terre et le niveau moyen de la mer désignent la même surface de référence.

1 Introduction

La présente Annexe contient la description d'une méthode procédant par étapes pour calculer l'affaiblissement de transmission de référence sur un trajet défini par l'utilisateur, dont les paramètres sont les suivants:

- la hauteur des terminaux h_{r1} et h_{r2} , en km au-dessus du niveau moyen de la mer, avec $0,0015 \leq h_{r1,2} \leq 20$ (1,5 mètre à 20 000 mètres);
- la fréquence f en MHz, avec $100 \leq f \leq 30\,000$ MHz;
- le pourcentage de temps p , avec $1 \leq p \leq 99$;
- la distance le long du grand cercle, d , entre les deux terminaux, en km;
- le paramètre indiquant la polarisation rectiligne horizontale ou verticale, T_{pol} .

Pour certains scénarios aéronautiques, les géométries de liaisons sont définies par l'angle d'élévation du terminal bas par rapport au terminal haut (au lieu de la distance le long du grand cercle entre les terminaux). Il convient par conséquent de fournir l'ensemble d'équations ci-après afin de convertir un angle d'élévation en espace libre, $\theta_{\text{élev}}$, en une distance le long du grand cercle, d , afin de faciliter l'utilisation de la présente Recommandation.

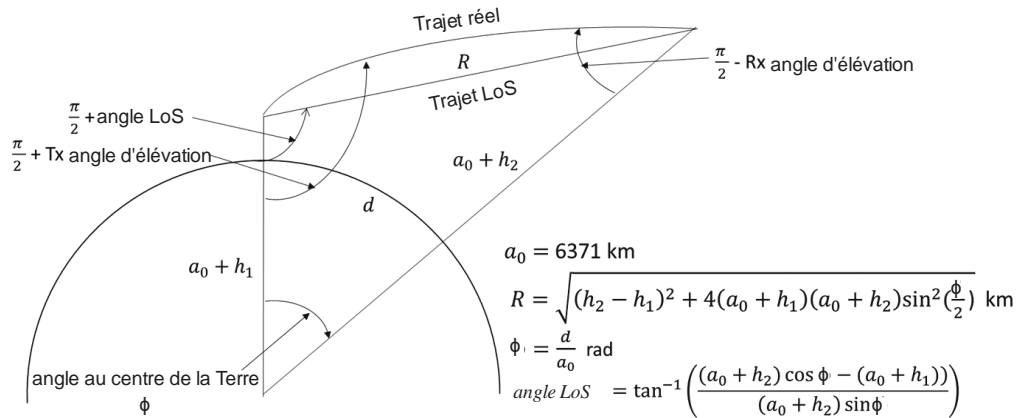
$$\phi = \arcsin\left(\frac{6\,371+h_{r1}}{6\,371+h_{r2}} \cos \theta_{\text{élev}}\right) \quad (\text{rad}) \quad (4)$$

$$\theta_{ca} = \frac{\pi}{2} - \theta_{\text{élev}} - \phi \quad (\text{rad}) \quad (5)$$

$$d = 63\,710 \theta_{ca} \quad (\text{km}) \quad (6)$$

La Figure 1 indique les relations entre plusieurs paramètres utilisés dans la présente Recommandation.

FIGURE 1
Relations entre plusieurs paramètres dans le cas d'une liaison air-sol



P.0528-01

Il convient de noter que les effets de courbure du rayon sur le trajet réel sont accentués pour plus de clarté.

2 Hypothèses et définitions

Les valeurs suivantes sont prises par hypothèse dans la Recommandation UIT-R P.528:

- a_0 : le rayon moyen de la Terre, fixé à 6 371 km
- a_e : le rayon équivalent de la Terre, fixé à 9 257 km
- ϵ_r : la constante diélectrique relative, fixée à 15 (correspond à un sol moyen)
- σ : la conductivité, fixée à 0,005 S/m (correspond à un sol moyen).

3 Méthode par étapes

Étape 3-1: Calculer les paramètres liés à chaque terminal. Ce calcul s'effectue selon les modalités présentées au § 4, tant pour le terminal bas que pour le terminal haut. Une fois cette étape achevée, passer à l'étape 3-2. Utiliser la méthode du § 4 de la manière suivante:

soit:

- $h_{r1,2}$: la hauteur du terminal au-dessus du niveau moyen de la mer, en km
- f : la fréquence, en MHz

trouver:

- $d_{r1,2}$: la distance le long du grand cercle à l'horizon du terminal pour une Terre régulière, en km
- $\theta_{r1,2}$: l'angle d'incidence du rayon rasant provenant de l'horizon du terminal pour une Terre régulière, en radians
- $h_{e1,2}$: la hauteur équivalente du terminal, en km

- $\Delta h_{1,2}$: le facteur de correction de la hauteur du terminal, en km
 $A_{a1,2}$: l'affaiblissement médian dû à l'absorption atmosphérique pour le rayon allant du terminal à son horizon pour une Terre régulière, en dB
 $r_{1,2}$: la longueur du trajet du rayon entre le terminal et son horizon pour une Terre régulière, en km.

Étape 3-2: Déterminer la distance maximale en visibilité directe, d_{ML} , entre les deux terminaux.

$$d_{ML} = d_{r1} + d_{r2} \quad (\text{km}) \quad (7)$$

Étape 3-3: La diffraction sur une Terre régulière est modélisée de manière linéaire dans la présente Recommandation. Cette modélisation est effectuée en choisissant deux points très distants de d_{ML} , en calculant l'affaiblissement dû à la diffraction sur une Terre régulière à ces distances, et en construisant une ligne de diffraction sur une Terre régulière qui passe par ces deux points.

Étape 3-3.1: Au moyen de l'équation (7), calculer deux distances, d_3 et d_4 , qui vont bien au-delà de la distance maximale en visibilité directe d_{ML} .

$$d_3 = d_{ML} + 0,5(a_e^2/f)^{1/3} \quad (\text{km}) \quad (8)$$

$$d_4 = d_{ML} + 1,5(a_e^2/f)^{1/3} \quad (\text{km}) \quad (9)$$

Étape 3-3.2: Calculer les affaiblissements par diffraction A_{d3} et A_{d4} aux distances correspondantes d_3 et d_4 . Il faudra à cet effet appliquer la méthode présentée au § 10 à deux reprises, une fois pour chaque longueur $d_{3,4}$. Une fois le processus achevé, passer à l'étape 3-3.3. Utiliser la méthode du § 10 de la manière suivante:

soit:

- $d_{3,4}$: la distance concernée, d_0 , conformément au § 10, en km
 $d_{r1,2}$: la distance le long du grand cercle à l'horizon des terminaux pour une Terre régulière, h_1 et h_2 , en km, déterminée selon l'étape 3-1 ci-dessus
 f : la fréquence, en MHz
 T_{pol} : le paramètre indiquant la polarisation rectiligne horizontale ou verticale

trouver:

- $A_{d3,4}$: l'affaiblissement par diffraction sur une Terre régulière, A_d , en dB, correspondant à la distance $d_{3,4}$.

Étape 3-3.3: Établir la ligne de diffraction sur une Terre régulière à partir des deux distances, d_3 et d_4 , ainsi que leur affaiblissement respectif, A_{d3} et A_{d4} , en calculant la pente M_d et l'interception A_{d0} .

$$M_d = (A_{d4} - A_{d3}) / (d_4 - d_3) \quad (\text{dB/km}) \quad (10)$$

$$A_{d0} = A_{d4} - M_d d_4 \quad (\text{dB}) \quad (11)$$

Étape 3-3.4: Calculer l'affaiblissement par diffraction à la distance d_{ML} .

$$A_{dML} = M_d d_{ML} + A_{d0} \quad (\text{dB/km}) \quad (12)$$

Étape 3-3.5: Calculer la distance d_d , à laquelle le modèle de diffraction prédit un affaiblissement de 0 dB.

$$d_d = -(A_{d0} / M_d) \quad (\text{km}) \quad (13)$$

Étape 3-4: Déterminer si le trajet de propagation se trouve dans la zone en visibilité directe ou s'il s'agit d'un trajet transhorizon pour la distance d recherchée. Si $d < d_{ML}$ le trajet est en visibilité directe et on passe à l'étape 3-5. Sinon, le trajet est transhorizon et on passe aux étapes 3-6 à 3-12.

Étape 3-5: Se reporter au § 6 pour effectuer les calculs concernant la zone en visibilité directe.

Étape 3-6: Dans la zone transhorizon ($d \geq d_{ML}$), à mesure que la distance augmente, le trajet de propagation est tout d'abord soumis à une diffraction sur une Terre régulière, puis il est progressivement soumis à une diffusion troposphérique. Les modèles de diffraction sur une Terre régulière et de diffusion troposphérique doivent être cohérents sur le plan physique au point de transition. Cette cohérence physique implique qu'il ne peut y avoir de discontinuité au point de transition. Étant donné que le modèle de diffusion troposphérique n'est pas linéaire, le processus itératif ci-dessous permet de faire en sorte que la transition entre les deux modèles se déroule sans discontinuité.

Étape 3-6.1: Soit d' et d'' les distances des essais itératifs, initialisées à:

$$d' = d_{ML} + 3 \quad (\text{km}) \quad (14)$$

$$d'' = d_{ML} + 2 \quad (\text{km}) \quad (15)$$

Étape 3-6.2: Calculer les affaiblissements dus à la diffusion troposphérique A'_s et A''_s respectivement aux distances d' et d'' . Cela nécessite d'utiliser les étapes décrites au § 11 pour déterminer les deux distances d' et d'' . Utiliser la méthode du § 11 de la manière suivante:

soit:

d : les distances d' et d'' concernées, en km

$d_{r1,2}$: la distance le long du grand cercle à l'horizon du terminal pour une Terre régulière, en km

f : la fréquence, en MHz

$h_{e1,2}$: la hauteur équivalente du terminal, en km

trouver:

A_s : l'affaiblissement dû à la diffusion troposphérique correspondant à d' et d'' , en dB.

Étape 3-6.3: Calculer la pente M_s de la ligne passant par les deux points de diffusion troposphérique (d', A'_s) et (d'', A''_s) en partant de l'étape 3-6.2. Cette ligne est approximativement tangente au modèle de diffusion troposphérique à la distance d' .

$$M_s = \frac{A'_s - A''_s}{d' - d''} \quad (\text{dB/km}) \quad (16)$$

Étape 3-6.4: Comparer la pente M_s à la pente de la ligne de diffraction M_d obtenue par l'équation (10). Si $M_s > M_d$, augmenter les deux distances d' et d'' de 1 km et revenir à l'étape 3-6.2 pour poursuivre l'itération. Sinon, passer à l'étape 3-6.5.

Étape 3-6.5: Les résultats du modèle de diffusion troposphérique ne sont pas valables s'ils sont inférieurs à 20 dB. Si A'_s ou A''_s est inférieur à 20 dB, augmenter les deux distances d' et d'' de 1 km et revenir à l'étape 3-6.2 pour poursuivre l'itération. Sinon, passer à l'étape 3-6.6.

Étape 3-6.6: Si $M_s \leq M_d$, la distance d' représente la distance approximative à laquelle soit:

Cas 1: Il existe une intersection certaine entre le modèle de diffraction et le modèle de diffusion troposphérique à une distance $\geq d'$ en raison du comportement du sous-modèle. L'affaiblissement dû à la propagation dans la zone transhorizon est donc cohérent sur le plan physique.

Cas 2: La ligne de diffraction est parallèle à la tangente du modèle de diffusion troposphérique. Cependant, l'affaiblissement dû à la propagation dans la zone transhorizon

peut ne pas être cohérent sur le plan physique, c'est-à-dire qu'il pourrait y avoir une discontinuité.

Pour déterminer lequel des deux cas se vérifie, il faut trouver l'affaiblissement dû à la diffraction à la distance d'' .

$$A_d'' = M_d d'' + A_{d0} \quad (\text{dB}) \quad (17)$$

Si $A_s'' \geq A_d''$, le cas 1 présenté à l'étape 3-6.6 se vérifie et on passe à l'étape 3-7 des calculs. Sinon, il faut corriger la pente de la ligne de diffraction au point tangent d' en s'assurant de la cohérence physique du modèle de propagation transhorizon. Cette correction est effectuée en fixant une extrémité de la ligne de diffraction au point $(d_{ML}, A_{d_{ML}})$ et l'autre extrémité au point (d'', A_s'') , puis en recalculant la nouvelle ligne de diffraction sur une Terre régulière.

$$M_d = \frac{A_s'' - A_{d_{ML}}}{d'' - d_{ML}} \quad (\text{dB/km}) \quad (18)$$

$$A_{d0} = A_s' - M_d d' \quad (\text{dB}) \quad (19)$$

La zone transhorizon est alors cohérente sur le plan physique. Passer à l'étape 3-7.

Étape 3-7: Calculer A_T , l'affaiblissement non représenté par l'affaiblissement dû à la propagation en espace libre et à l'affaiblissement dû à l'absorption atmosphérique. Ce calcul est fondé sur les modèles de diffraction et de diffusion troposphérique, compte tenu des corrections éventuellement faites à l'étape 3-6.

Étape 3-7.1: Calculer la prévision d'affaiblissement dû à la diffraction sur une Terre régulière, A_d , pour la longueur du trajet d .

$$A_d = M_d d + A_{d0} \quad (\text{dB}) \quad (20)$$

Étape 3-7.2: Calculer l'affaiblissement dû à la diffusion troposphérique, A_s , pour la longueur du trajet d . Utiliser la méthode du § 7 de la manière suivante:

soit:

- d : la longueur du trajet le long du grand cercle entre les deux terminaux, en km
- $d_{r1,2}$: la distance le long du grand cercle à l'horizon du terminal pour une Terre régulière, en km
- f : la fréquence, en MHz
- $h_{e1,2}$: la hauteur équivalente du terminal, en km

trouver:

- A_s : l'affaiblissement dû à la diffusion troposphérique, en dB
- h_v : la hauteur au volume commun, en km
- θ_s : l'angle de diffusion, en radians.

Étape 3-7.3: Choisir la valeur d'affaiblissement en fonction des éléments suivants:

Si $d < d'$ (d' étant issue de l'itération finale prévue à l'étape 3-6), alors:

$$A_T = A_d \quad (\text{dB}) \quad (21)$$

Sinon, selon que le cas 1 ou 2 s'est vérifié à l'étape 3-6.6:

$$A_T = \begin{cases} \text{Min}(A_d, A_s), & \text{le cas 1 est VRAI} \\ A_s, & \text{le cas 2 est VRAI} \end{cases} \quad (\text{dB}) \quad (22)$$

Étape 3-8: Utiliser la méthode du tracé du rayon présentée au § 5 pour déterminer les paramètres suivants:

soit:

h_v : la hauteur au volume commun, en km, reprise de l'étape 3-7.2

f : la fréquence, en MHz

trouver:

A_{av} : l'affaiblissement médian dû à l'absorption atmosphérique pour le trajet du rayon allant de l'horizon au volume commun, en dB

r_v : la longueur du trajet du rayon allant de l'horizon au volume commun, en km.

Étape 3-9: Calculer l'affaiblissement médian total dû à l'absorption atmosphérique, A_a , en dB, pour le trajet, au moyen des résultats des étapes 3-1 et 3-8:

$$A_a = A_{a1} + A_{a2} + 2A_{av} \quad (\text{dB}) \quad (23)$$

Étape 3-10: Calculer l'affaiblissement en espace libre, A_{fs} , en dB, pour le trajet:

$$r_{fs} = r_1 + r_2 + 2r_v \quad (\text{km}) \quad (24)$$

$$A_{fs} = 20 \log_{10} f + 20 \log_{10} r_{fs} + 32,45 \quad (\text{dB}) \quad (25)$$

Étape 3-11: Calculer l'affaiblissement dû à la variabilité à long terme, $Y(p)$, pour le pourcentage de temps p . Utiliser la méthode présentée au § 12; puis passer à l'étape 3-12.

Soit:

$h_{r1,2}$: la hauteur du terminal au-dessus du niveau moyen de la mer, en km

d : la longueur du trajet le long du grand cercle entre les terminaux, en km

f : la fréquence, en MHz

p : le pourcentage de temps

A_T : l'affaiblissement obtenu à l'étape 3-7.3, en dB

θ_s : l'angle de diffusion obtenu à l'étape 3-7.2, en radians

trouver:

$Y(p)$: l'affaiblissement dû à la variabilité à long terme, $Y_{total}(p)$, en dB.

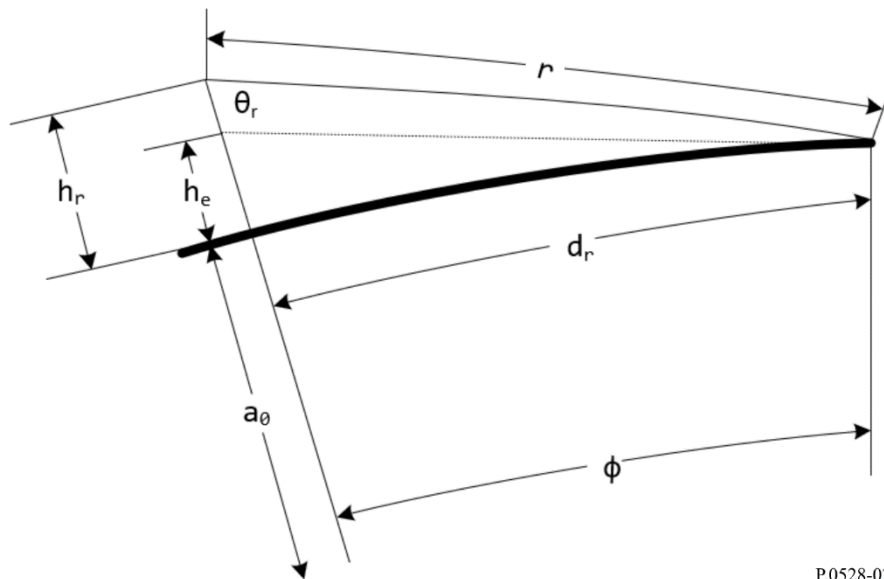
Étape 3-12: Calculer l'affaiblissement de transmission de référence, L_b , en dB.

$$L_b = A_{fs} + A_a + A_T + Y(p) \quad (\text{dB}) \quad (26)$$

Ce calcul achève la procédure par étapes pour un trajet transhorizon fondée sur les paramètres définis par l'utilisateur.

4 Paramètres du terminal

FIGURE 2
Géométrie du terminal



P.0528-02

On trouvera dans la présente section le calcul des paramètres suivants, qui sont liés à un terminal, comme indiqué dans la Fig. 2.

Soit:

h_r : la hauteur du terminal au-dessus du niveau moyen de la mer, en km

f : la fréquence, en MHz

trouver:

d_r : la distance du grand cercle à l'horizon du terminal pour une Terre régulière, en km

θ_r : l'angle d'incidence du rayon rasant provenant de l'horizon du terminal pour une Terre régulière, en radians

h_e : la hauteur équivalente du terminal, en km

Δh : le facteur de correction de la hauteur du terminal, en km

A_a : l'affaiblissement médian dû à l'absorption atmosphérique pour le rayon allant du terminal à son horizon pour une Terre régulière, en dB

r : la longueur du trajet du rayon entre le terminal et son horizon pour une Terre régulière, en km.

Étape 4-1: Utiliser la méthode du tracé du rayon présentée au § 5 pour déterminer les éléments suivants:

soit:

h_r : la hauteur du terminal au-dessus du niveau moyen de la mer, en km

f : la fréquence, en MHz

trouver:

- d_r : la distance du grand cercle à l'horizon du terminal pour une Terre régulière, en km
- θ_r : l'angle d'incidence du rayon rasant provenant de l'horizon du terminal pour une Terre régulière, en radians
- A_a : l'affaiblissement médian dû à l'absorption atmosphérique pour le rayon allant du terminal à son horizon pour une Terre régulière, en dB
- r : la longueur du trajet du rayon entre le terminal et son horizon pour une Terre régulière, en km.

Étape 4-2: Calculer la hauteur équivalente du terminal, h_e , en km.

$$\phi = d_r/a_e \quad (\text{rad}) \quad (27)$$

$$h_e = \frac{a_e}{\cos \phi} - a_e \quad (\text{km}) \quad (28)$$

Étape 4-3: Calculer le facteur de correction de la hauteur du terminal, Δh .

$$\Delta h = h_r - h_e \quad (\text{km}) \quad (29)$$

Cette étape achève le calcul des paramètres du terminal.

5 Tracé du rayon

Les ondes radioélectriques qui traversent l'atmosphère se courbent en raison de variations du coïndice de réfraction de l'atmosphère. Dans les modèles terrestres classiques, cette courbure est en principe prise en compte par la méthode dite du «rayon de la Terre égal à 4/3», qui modélise un gradient de réfraction de l'atmosphère linéaire et offre une approximation acceptable pour des trajets proches de la surface. Cependant, le gradient réel de l'atmosphère étant exponentiel, l'emploi d'un modèle linéaire risque d'induire des erreurs considérables sur des trajets de propagation air-sol.

La présente Recommandation prévoit l'emploi de techniques de tracé du rayon définies dans l'Annexe 1 de la Recommandation UIT-R P.676-12 pour calculer le trajet des rayons à travers l'atmosphère. Celle-ci est considérée comme l'atmosphère de référence moyenne annuelle pour le monde entier définie dans la Recommandation UIT-R P.835-6.

Soit:

- h_r : la hauteur du terminal au-dessus du niveau moyen de la mer, en km
- f : la fréquence, en MHz

trouver:

- d_r : la distance du grand cercle à l'horizon du terminal pour une Terre régulière, en km
- θ_r : l'angle d'incidence du rayon rasant provenant de l'horizon du terminal pour une Terre régulière, en radians
- A_a : l'affaiblissement médian dû à l'absorption atmosphérique pour le rayon allant du terminal à son horizon pour une Terre régulière, en dB
- r : la longueur du trajet du rayon entre le terminal et son horizon pour une Terre régulière, en km (désignée par a dans la Recommandation UIT-R P.676-12)
- τ : l'angle de courbure du trajet du rayon (désigné par *courbure* dans la Recommandation UIT-R P.676-12).

Étape 5-1: Au moyen de l'Annexe 1 de la Recommandation UIT-R P.676-12, tracer un rayon rasant ($\beta = \pi/2$) depuis la surface de la Terre jusqu'à la hauteur h_r du terminal.

Pendant le processus de tracé du rayon, calculer l'angle de courbure total du rayon, τ (désigné par *courbure* dans la Recommandation UIT-R P.676-12), l'absorption atmosphérique sur le trajet du rayon, A_a , et la longueur du trajet du rayon, r (désignée par a dans la Recommandation UIT-R P.676-12).

Étape 5-2: Calculer l'angle d'incidence, θ_r , du rayon au niveau du terminal. L'étape 5-1 donne un angle final α_i par rapport au zénith.

$$\theta_r = \frac{\pi}{2} - \alpha_i \quad (\text{rad}) \quad (30)$$

Étape 5-3: Calculer la distance le long du grand cercle à la surface de la Terre entre le terminal et son horizon pour une Terre régulière en utilisant l'angle central ϕ .

$$\phi = \theta_r + \tau \quad (\text{rad}) \quad (31)$$

$$d_r = \phi a_0 \quad (\text{km}) \quad (32)$$

Cette étape achève la section sur le tracé du rayon.

6 Zone en visibilité directe

On trouvera dans la présente section une description des étapes à suivre pour calculer l'affaiblissement dû à la propagation sur un trajet en visibilité directe.

Soit:

- d_{ML} : la distance maximale en visibilité directe, en km, fournie par l'équation (7)
- d_d : la distance pour laquelle le modèle de diffraction prévoit un affaiblissement de 0 dB, en km, donnée par l'équation (13)
- $h_{e1,2}$: la hauteur équivalente du terminal, en km
- $d_{r1,2}$: la distance du grand cercle à l'horizon du terminal pour une Terre régulière, en km
- f : la fréquence, en MHz
- A_{dML} : l'affaiblissement dû à la diffraction à la distance d_{ML} , en dB, donné par l'équation (12)
- p : le pourcentage de temps
- d : la longueur du trajet le long du grand cercle entre les terminaux, en km

trouver:

- L_b : l'affaiblissement de transmission de référence, en dB
- K : la valeur utilisée dans des calculs de variabilité ultérieurs.

Étape 6-1: Calculer la longueur d'onde λ .

$$\lambda = 0,2997925/f \quad (\text{km}) \quad (33)$$

Étape 6-2: Déterminer ψ_{limite} , l'angle de réflexion correspondant à la distance à laquelle $\Delta r = \lambda/2$, où Δr est la différence de longueur de rayon entre le rayon direct et le rayon indirect. Pour déterminer ψ_{limite} , appliquer l'optique des rayons décrite au § 7 de manière récursive de façon à effectuer une recherche binaire de la valeur de ψ_{limite} . Mettre à jour la valeur de ψ_{limite} en tenant compte du fait qu'une augmentation de ψ entraîne une augmentation de Δr . Utiliser la méthode du § 7 de la manière suivante:

soit:

ψ : l'angle de réflexion du rayon, en radians

$h_{r1,2}$: la hauteur du terminal au-dessus du niveau moyen de la mer, en km

$\Delta h_{1,2}$: le facteur de correction de la hauteur du terminal, en km

trouver:

Δr : la différence de longueur de rayon entre le rayon direct et le rayon indirect, en km

d : la longueur du trajet le long du grand cercle entre les terminaux pour un angle de réflexion ψ , en km.

Étape 6-3: Déterminer $d_{\lambda/6}$, qui est la distance à laquelle la différence de longueur de trajet entre l'onde directe et l'onde réfléchi est de $\lambda/6$ mètres. Comme dans l'étape 6-2, déterminer cette distance en appliquant l'optique des rayons décrite au § 7 de manière récursive de façon à effectuer une recherche binaire de la valeur de ψ . Utiliser la méthode du § 7 de la manière suivante:

soit:

ψ : l'angle de réflexion du rayon, en radians

$h_{r1,2}$: la hauteur du terminal au-dessus du niveau moyen de la mer, en km

$\Delta h_{1,2}$: le facteur de correction de la hauteur du terminal, en km

trouver:

$d_{\lambda/6}$: la distance du grand cercle entre les terminaux pour un angle de réflexion ψ , en km.

Étape 6-4: Déterminer la distance d_0 , en km.

Si $d \geq d_d$ ou $d_d \geq d_{ML}$,

$$d_o = \begin{cases} d_1, & d > d_{\lambda/6} \text{ ou } d_{\lambda/6} > d_{ML} \\ d_{\lambda/6}, & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{km}) \quad (34)$$

sinon si $d_d < d_{\lambda/6}$ et $d_{\lambda/6} < d_{ML}$,

$$d_o = \begin{cases} d_{\lambda/6}, & d_d < d_{\lambda/6} \text{ et } d_{\lambda/6} < d_{ML} \\ d_d, & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{km}) \quad (35)$$

Étape 6-5: La valeur en cours de la distance d_0 peut être une approximation pour certains trajets. Pour affiner cette valeur, il faut convertir de manière itérative la distance en un angle de réflexion ψ en utilisant l'étape 6-3 et en calculant l'optique des rayons décrite au § 7. Si la distance d obtenue de cette manière est supérieure ou égale à la distance d_0 originale, ou si le fait d'augmenter la distance d'un mètre rend cette distance supérieure à d_{ML} , attribuer à d_0 la valeur de la distance résultant de l'optique des rayons. Sinon, augmenter la distance d'un mètre et refaire les calculs en employant la méthode de l'optique des rayons.

Étape 6-6: Calculer l'affaiblissement en visibilité directe à la distance d_0 . Tout d'abord, appliquer de nouveau la méthode décrite au § 7 pour déterminer la valeur de ψ_{d0} ; puis utiliser la méthode présentée au § 8 pour déterminer l'affaiblissement A_{d0} .

Étape 6-7: Convertir la distance d souhaitée pour obtenir l'angle de réflexion ψ correspondant en appliquant la méthode décrite au § 7 de manière récursive. Soit d_{ro} la distance finale obtenue par l'optique des rayons.

Étape 6-8: Utiliser les méthodes présentées aux § 7 et 8 pour calculer l'affaiblissement en visibilité directe; puis passer à l'étape 6-11. Utiliser les méthodes des § 7 et 8 de la manière suivante:

soit:

ψ : l'angle de réflexion du rayon, en radians

$h_{r1,2}$: la hauteur du terminal au-dessus du niveau moyen de la mer, en km

$\Delta h_{1,2}$: le facteur de correction de la hauteur du terminal, en km

trouver:

Δr : la différence de longueur de rayon entre le rayon direct et le rayon indirect, en km

d : la distance entre les terminaux correspondant à l'angle de réflexion ψ , en km.

Étape 6-9: Calculer l'affaiblissement médian dû à l'absorption atmosphérique, A_a , pour le trajet en appliquant l'Annexe 1 de la Recommandation UIT-R P.676. Tracer le rayon entre le terminal bas et le terminal haut en utilisant θ_{h1} comme angle d'élévation (en tenant dûment compte du fait que θ_{h1} est donné par rapport à l'horizon du terminal, alors que, dans la Recommandation UIT-R P.676, la référence utilisée est le zénith). L'angle θ_{h1} est calculé au moyen de l'équation (53) au cours de l'étape 6-8. Lors du tracé du rayon, calculer également la longueur totale du rayon, r_{LOS} , en km.

Étape 6-10: Calculer l'affaiblissement en espace libre, A_{fs} , en dB.

$$A_{fs} = 20 \log_{10} r_{LOS} + 20 \log_{10} f + 32,45 \quad (\text{dB}) \quad (36)$$

Étape 6-11: Calculer la part de la variabilité dans l'affaiblissement total. Utiliser la méthode décrite au § 13 pour calculer Y_{total} ; puis passer à l'étape 6-12. Utiliser la méthode du § 13 de la manière suivante:

soit:

$h_{r1,2}$: la hauteur du terminal au-dessus du niveau moyen de la mer, en km

d : la longueur du trajet le long du grand cercle entre les terminaux, en km

f : la fréquence, en MHz

p : le pourcentage de temps

trouver:

$Y(p)$: l'affaiblissement dû à la variabilité à long terme, en dB.

Étape 6-12: Calculer l'affaiblissement de transmission de référence.

$$A = A_{fs} + A_a + A_{LOS} + Y(p) \quad (\text{dB}) \quad (37)$$

Étape 6-13: Les statistiques relatives à la variabilité figurant dans la Recommandation UIT-R P.528 représentent les modifications attendues du niveau du signal au cours du temps. Elles peuvent être traitées indépendamment des statistiques relatives à l'affaiblissement dû à des groupes d'obstacles décrites dans la Recommandation UIT-R P.2108. Par conséquent, si une extrémité de la liaison se situe à l'intérieur d'un groupe d'obstacles artificiel, comme indiqué et prescrit dans la Recommandation UIT-R P.2108, la méthode de détermination de l'affaiblissement dû à un groupe d'obstacles et la distribution statistique de l'affaiblissement du signal correspondante décrite au § 3.3 de la Recommandation UIT-R P.2108 peuvent être combinées avec les résultats statistiques de la Recommandation UIT-R P.528.

Si l'on souhaite tenir compte de l'affaiblissement dû à un groupe d'obstacles, calculer la valeur de L_{ces} comme indiqué au § 3.3 de la Recommandation UIT-R P.2108 en utilisant la valeur de θ_{h1} (donnée par l'équation (53)) comme angle d'élévation. La valeur de L_{ces} ainsi obtenue peut ensuite être ajoutée au résultat de l'équation (37).

Ce calcul achève la procédure par étapes pour un trajet en visibilité directe fondée sur les paramètres définis par l'utilisateur.

7 Optique des rayons en visibilité directe

On trouvera dans cette section une présentation de la méthode permettant de déterminer, par l'optique des rayons, les paramètres du trajet géométrique de deux terminaux séparés par une certaine distance en visibilité directe.

Les paramètres d'entrée de cette méthode sont les suivants:

- ψ : l'angle de réflexion du rayon, en radians
- $h_{r1,2}$: la hauteur du terminal au-dessus du niveau moyen de la mer, en km
- $\Delta h_{1,2}$: le facteur de correction de la hauteur du terminal, en km.

Les paramètres de sortie de cette méthode sont les suivants:

- Δr : la différence de longueur de rayon entre le rayon direct et le rayon indirect, en km
- d : la distance le long du grand cercle entre les terminaux pour un angle de réflexion ψ , en km.

Étape 7-1: Calculer le rayon de la Terre corrigé a_a :

$$z = (a_0/a_e) - 1 \quad (38)$$

$$k_a = 1/(1 + z \cos \psi) \quad (39)$$

$$a_a = a_0 k_a \quad (\text{km}) \quad (40)$$

Étape 7-2: Calculer les facteurs de correction de la hauteur des terminaux après correction du rayon de la Terre $\Delta h_{a1,2}$.

$$\Delta h_{a1,2} = \Delta h_{1,2} (a_a - a_0)/(a_e - a_0) \quad (\text{km}) \quad (41)$$

Étape 7-3: Calculer les hauteurs $H_{1,2}$.

$$H_{1,2} = h_{r1,2} - \Delta h_{a1,2} \quad (\text{km}) \quad (42)$$

Étape 7-4: Calculer les paramètres géométriques des terminaux $z_{1,2}$, $\theta_{1,2}$, $D_{1,2}$, et $H'_{1,2}$.

$$z_{1,2} = a_a + H_{1,2} \quad (\text{km}) \quad (43)$$

$$\theta_{1,2} = \arccos(a_a \cos \psi / z_{1,2}) - \psi \quad (\text{rad}) \quad (44)$$

$$D_{1,2} = z_{1,2} \sin \theta_{1,2} \quad (\text{km}) \quad (45)$$

$$H'_{1,2} = \begin{cases} H_{1,2}, & \psi > 1,56 \\ D_{1,2} \tan \psi, & \psi \leq 1,56 \end{cases} \quad (\text{km}) \quad (46)$$

Étape 7-5: Calculer Δz , la différence entre les distances radiales.

$$\Delta z = |z_1 - z_2| \quad (\text{km}) \quad (47)$$

Étape 7-6: Calculer la longueur du trajet entre les deux terminaux pour un angle de réflexion de ψ .

$$d = \max(a_a(\theta_1 + \theta_2), 0) \quad (\text{km}) \quad (48)$$

Étape 7-7: Une fois les paramètres géométriques calculés, déterminer la longueur du rayon direct r_0 et du rayon indirect r_{12} .

$$\alpha = \arctan((H'_2 - H'_1)/(D_1 + D_2)) \quad (\text{rad}) \quad (49)$$

$$r_0 = \max(\Delta z, (D_1 + D_2)/\cos \alpha) \quad (\text{km}) \quad (50)$$

$$r_{12} = (D_1 + D_2)/\cos \psi \quad (\text{km}) \quad (51)$$

Étape 7-8: Calculer la différence de longueur entre les deux rayons.

$$\Delta r = 4 H'_1 H'_2 / (r_0 + r_{12}) \quad (\text{km}) \quad (52)$$

Étape 7-9: Calculer les angles $\theta_{h1,2}$.

$$\theta_{h1} = \alpha - \theta_1 \quad (\text{rad}) \quad (53)$$

$$\theta_{h2} = -(\alpha + \theta_2) \quad (\text{rad}) \quad (54)$$

Cette étape achève la présente section.

8 Calcul de l'affaiblissement en visibilité directe

On trouvera dans cette section une description de la manière de calculer l'affaiblissement sur un trajet en visibilité directe.

Soit:

d : la longueur du trajet concerné, en km

ψ : l'angle de réflexion du rayon, en radians

d_0 : la longueur du trajet à partir de laquelle la diffraction commence à avoir une incidence sur la zone en visibilité directe, en km (donnée à l'étape 6-5)

f : la fréquence, en MHz

trouver:

A_{LOS} : l'affaiblissement en visibilité directe, en dB.

Étape 8-1: Si la longueur du trajet d est supérieure à d_0 , alors le trajet se trouve dans la zone de mélange de la diffraction en visibilité directe et l'affaiblissement A_{LOS} est déterminé au moyen de l'équation (55) et cela achève la présente section. Sinon, $d \leq d_0$ et on passe à l'étape 8-2.

$$A_{LOS} = ((d - d_0)(A_{dML} - A_{d0}) / (d_{ML} - d_0)) + A_{d0} \quad (\text{dB}) \quad (55)$$

Étape 8-2: En utilisant ψ_{limite} obtenu à l'étape 6-2, si l'angle de réflexion $\psi > \psi_{limite}$, fixer $A_{LOS} = 0$ dB et cela achève la présente section, car la Recommandation UIT-R P.528 ne prend pas en compte de modèle à deux rayons dans cette zone. Sinon, $\psi \leq \psi_{limite}$ et passer à l'étape 8-3.

Étape 8-3: La longueur du trajet d est telle que la Recommandation UIT-R P.528 prévoit l'emploi d'un modèle à deux rayons. Calculer la longueur d'onde λ .

$$\lambda = 0,2997925 / f \quad (\text{km}) \quad (56)$$

Étape 8-4: Calculer les coefficients de réflexion complexe, R_g et ϕ_g par la méthode présentée au § 9.

Étape 8-5: Le facteur de divergence D_v tient compte du fait qu'une réflexion provenant d'une surface de la Terre courbée et régulière est moins efficace qu'une réflexion provenant d'une Terre plate. Calculer le facteur de divergence pour le trajet, en utilisant la valeur de $D_{1,2}$, calculée au moyen de l'équation (45).

$$r_{1,2} = D_{1,2} / \cos \psi \quad (\text{km}) \quad (57)$$

$$R_r = (r_1 r_2) / r_{1,2} \quad (\text{km}) \quad (58)$$

$$D_v = \left[1 + \frac{2R_r(1+\sin^2 \psi)}{a_a \sin \psi} + \left(\frac{2R_r}{a_a} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (59)$$

Étape 8-6: Le facteur de longueur du rayon F_r tient compte des géométries dans lesquelles le rayon direct est d'une amplitude considérablement plus grande (et d'une longueur considérablement plus courte) que le rayon indirect, ce qui est le cas de deux terminaux en haute altitude et proches l'un de l'autre, par exemple deux avions. Calculer F_r , en utilisant la valeur de r_{12} calculée au moyen de l'équation (51):

$$F_r = \min(r_0 / r_{12}, 1) \quad (60)$$

Étape 8-7: Calculer les coefficients de réflexion équivalente R_{Tg} et ϕ_{Tg} .

$$R_{Tg} = R_g D_v F_r \quad (61)$$

$$\phi_{Tg} = (2 \pi \Delta r / \lambda) + \phi_g \quad (62)$$

Étape 8-8: Calculer l'affaiblissement A_{LOS} .

$$R = R_{Tg} \cos \phi_{Tg} - R_{Tg} \sin \phi_{Tg} \quad (63)$$

$$W_{RL} = \min(|1 + R|, 1) \quad (64)$$

$$W_{R0} = W_{RL}^2 \quad (65)$$

$$A_{LOS} = 10 \log_{10} W_{R0} \quad (66)$$

Cette étape achève la présente section.

9 Coefficients de réflexion du sol

On trouvera dans la présente section une description des étapes à suivre pour calculer les coefficients de réflexion du sol.

Soit:

ψ : l'angle de réflexion, en radians

f : la fréquence, en MHz

T_{pol} : le paramètre indiquant la polarisation rectiligne horizontale ou verticale

trouver:

R_g : la partie réelle du coefficient de réflexion

ϕ_g : la partie imaginaire du coefficient de réflexion.

Compte tenu des hypothèses précédentes concernant les propriétés électriques du sol, c'est-à-dire $\sigma = 0,005$ S/m et $\epsilon_r = 15$ (ce qui correspond au Groupe moyen):

Étape 9-1: Calculer les valeurs suivantes

$$X = 18\,000 \sigma / f \quad (67)$$

$$Y = \epsilon_r - \cos^2 \psi \quad (68)$$

$$T = [Y^2 + X^2]^{0,5} + Y \quad (69)$$

$$P = (0,5T)^{0,5} \quad (70)$$

$$Q = X / 2P \quad (71)$$

Étape 9-2: Calculer B et A suivant le paramètre de polarisation, T_{pol} .

$$B = \begin{cases} 1/(P^2 + Q^2), & \text{horizontal} \\ (\epsilon^2 + X^2)/(P^2 + Q^2), & \text{vertical} \end{cases} \quad (72)$$

$$A = \begin{cases} 2P/(P^2 + Q^2), & \text{horizontal} \\ (2(P\epsilon + QX))/(P^2 + Q^2), & \text{vertical} \end{cases} \quad (73)$$

Étape 9-3: Calculer les parties réelle et imaginaire du coefficient de réflexion.

$$R_g = \left[\frac{(1 + B \sin^2 \psi) - A \sin \psi}{(1 + B \sin^2 \psi) + A \sin \psi} \right]^{0,5} \quad (74)$$

$$\alpha = \begin{cases} \arctan 2(-Q, \sin \psi - P), & \text{horizontal} \\ \arctan 2((\epsilon \sin \psi) - Q, \epsilon \sin \psi - P), & \text{vertical} \end{cases} \quad (75)$$

$$\beta = \begin{cases} \arctan 2(Q, \sin \psi + P), & \text{horizontal} \\ \arctan 2((X \sin \psi) + Q, \epsilon \sin \psi + P), & \text{vertical} \end{cases} \quad (76)$$

$$\phi_g = \alpha - \beta \quad (77)$$

Cette étape achève la présente section.

10 Diffraction sur une Terre régulière

On trouvera dans la présente section une description des étapes à suivre pour calculer l'affaiblissement dû à une diffraction sur une Terre régulière à une distance définie dans la région de diffraction. Le modèle repose sur l'hypothèse d'un «sol moyen» ayant une conductivité de 0,005 S/m (σ) et une constante diélectrique relative de 15 (ϵ_r).

Soit:

d_0 : la longueur du trajet concerné, en km

$d_{r1,2}$: la distance du grand cercle à l'horizon du terminal pour une Terre régulière, en km

f : la fréquence, en MHz

T_{pol} : le paramètre indiquant la polarisation rectiligne horizontale ou verticale

trouver:

A_d : l'affaiblissement dû à une diffraction sur une Terre régulière, en dB.

L'affaiblissement dû à une diffraction sur une Terre régulière est calculé au moyen de l'équation (78):

$$A_d = G(x_0) - F(x_1) - F(x_2) - 20 \quad (\text{dB}) \quad (78)$$

Étape 10-1: Calculer K suivant le paramètre de polarisation, T_{pol} .

$$s = 18\,000 \sigma / f \quad (79)$$

$$K = \begin{cases} 0,01778 f^{-1/3} [(\epsilon_r - 1)^2 + s^2]^{-1/4}, & \text{horizontal} \\ 0,01778 f^{-1/3} \left[\frac{\epsilon_r^2 + s^2}{\sqrt{(\epsilon_r - 1)^2 + s^2}} \right]^{1/2}, & \text{vertical} \end{cases} \quad (80)$$

Étape 10-2: Calculer les distances normalisées.

$$x_{0,1,2} = (1,607 - K) f^{1/3} d_{0,1,2} \quad (\text{km}) \quad (81)$$

Étape 10-3: Calculer le facteur dépendant de la distance pour les trois distances normalisées.

$$G(x_{0,1,2}) = 0,05751 x_{0,1,2} - 10 \log_{10} x_{0,1,2} \quad (\text{dB}) \quad (82)$$

Étape 10-4: Calculer le terme $y_{1,2}$

$$y_{1,2} = 40 \log_{10} x_{1,2} - 117 \quad (\text{dB}) \quad (83)$$

Étape 10-5: Calculer les fonctions de hauteur.

Si $x_{1,2} \geq 2\,000$ km:

$$F(x_{1,2}) = G(x_{1,2}) \quad (\text{dB}) \quad (84)$$

Sinon si $200 < x_{1,2} < 2\,000$ km:

$$W_{1,2} = 0,0134x_{1,2}e^{(-0,005x_{1,2})} \quad (85)$$

$$F(x_{1,2}) = W_{1,2}y_{1,2} + (1 - W_{1,2})G(x_{1,2}) \quad (\text{dB}) \quad (86)$$

Sinon $x \leq 200$.

$$x_t = 450 / -(\log_{10} K)^3 \quad (\text{km}) \quad (87)$$

$$F(x_{1,2}) = \begin{cases} \begin{cases} y_{1,2}, & \text{abs}(y_{1,2}) < 117 \\ -117, & \text{sinon} \end{cases}, & x_{1,2} \geq x_t \\ 20 \log K - 15 + (0,000025 x_{1,2}^2 / K), & x_{1,2} \leq x_t \end{cases} \quad (\text{dB}) \quad (88)$$

Étape 10-6: Une fois que $G(x_0)$ et $F(x_{1,2})$ ont été calculés, utiliser l'équation (78) pour calculer l'affaiblissement dû à une diffraction sur une Terre régulière.

Cette étape achève la présente section.

11 Diffusion troposphérique

On trouvera dans la présente section une description des étapes à suivre pour calculer la diffusion troposphérique sur une distance donnée. Le calcul de l'affaiblissement dû à la diffusion troposphérique repose sur des techniques mathématiques qui prennent en compte les trajets courbés des rayons délimitant le volume commun des deux terminaux. La diffusion troposphérique est calculée au moyen de l'équation (89) ci-dessous:

$$A_s = S_e + S_v + 10 \log_{10}(\kappa\theta_s^3/\ell) \quad (\text{dB}) \quad (89)$$

Soit:

$d_{r1,2}$: la distance du grand cercle à l'horizon du terminal pour une Terre régulière, en km

$h_{e1,2}$ la hauteur équivalente du terminal, en km

f : la fréquence, en MHz

d : la longueur du trajet concerné, en km

trouver:

A_s : l'affaiblissement dû à la diffusion troposphérique, en dB

h_v : la hauteur au volume commun, en km

θ_s : l'angle de diffusion, en radians.

Étape 11-1: Calculer la distance sur laquelle se produit la diffusion d_s , en km.

$$d_s = d - d_{r1} - d_{r2} \quad (\text{km}) \quad (90)$$

Étape 11-2: Si $d_s = 0$, il n'y a pas de volume commun dans la géométrie du trajet, par conséquent la propagation consécutive à la diffusion troposphérique n'est pas prise en compte. Fixer les résultats ci-dessous et passer à l'étape 3-7.3 du § 3. Sinon, $d_s > 0$ et on passe à l'étape 11-3.

$$A_s = 0 \quad (\text{dB}) \quad (91)$$

$$h_v = 0 \quad (\text{km}) \quad (92)$$

$$\theta_s = 0 \quad (\text{rad}) \quad (93)$$

Étape 11-3: La longueur sur une Terre régulière de chaque rayon rasant du terminal jusqu'au centre du volume commun, d_z , est la suivante:

$$d_z = 0,5d_s \quad (\text{km}) \quad (94)$$

Étape 11-4: Calculer les paramètres du gradient atmosphérique:

$$A_m = 1/a_0 \quad (95)$$

$$dN = A_m - 1/a_e \quad (96)$$

$$\Gamma_e = N_s \times 10^{-6} / dN \quad (97)$$

Étape 11-5: Les équations suivantes servent à déterminer les paramètres géométriques liés à la diffusion troposphérique, notamment la hauteur du volume commun h_v en km et la pente des rayons à l'angle de transition θ_A en radians.

$$z_a = \frac{1}{2a_e} \left(\frac{d_z}{2} \right)^2 \quad (\text{km}) \quad (98)$$

$$z_b = \frac{1}{2a_e} (d_z)^2 \quad (\text{km}) \quad (99)$$

$$Q_o = A_m - dN \quad (100)$$

$$Q_{a,b} = A_m - dN * e^{-z_{a,b}/\gamma_e} \quad (101)$$

$$z_a' = (7Q_o + 6Q_a - Q_b) \frac{d_z^2}{96} \quad (\text{km}) \quad (102)$$

$$z_b' = (Q_o + 2Q_a) \frac{d_z^2}{6} \quad (\text{km}) \quad (103)$$

$$Q_{A,B} = A_m - dN * e^{-z_{a,b}'/\gamma_e} \quad (104)$$

$$h_v = (Q_o + 2Q_A) \frac{d_z^2}{6} \quad (\text{km}) \quad (105)$$

$$\theta_A = (Q_o + 4Q_A + Q_B) \frac{d_z}{6} \quad (\text{rad}) \quad (106)$$

$$\theta_s = 2 \theta_A \quad (\text{rad}) \quad (107)$$

Étape 11-6: Calculer le facteur d'efficacité de la diffusion S_e .

$$\epsilon_1 = (5,67 \times 10^{-6})N_s^2 - 0,00232N_s + 0,031 \quad (108)$$

$$\epsilon_2 = 0,0002N_s^2 - 0,06N_s + 6,6 \quad (109)$$

$$\gamma = 0,1424 \left(1 + \frac{\epsilon_1}{\exp[(h_v/4)^6]} \right) \quad (110)$$

$$S_e = 83,1 - \frac{\epsilon_2}{1+0,07716h_v^2} + 20 \log_{10}[(0,1424/\gamma)^2 e^{\gamma h_v}] \quad (\text{dB}) \quad (111)$$

Étape 11-7: Calculer le facteur de volume de diffusion S_V .

$$X_{A1,2} = h_{1,2}^2 + 4(a_e + h_{1,2})a_e \sin^2 \left(\frac{d_{1,2}}{2a_e} \right) \quad (112)$$

$$\ell_{1,2} = \sqrt{X_{A1,2}} + d_z \quad (\text{km}) \quad (113)$$

$$\ell = \ell_1 + \ell_2 \quad (\text{km}) \quad (114)$$

$$S = \frac{\ell_1 - \ell_2}{\ell} \quad (115)$$

$$\eta = \gamma \theta_s \ell / 2 \quad (116)$$

$$\kappa = f / 0,0477 \quad (117)$$

$$\rho_{1,2} = 2 \kappa \theta_s h_{1,2} \quad (\text{km}) \quad (118)$$

$$S_V = 10 \log_{10} \left(\frac{(A\eta^2 + B_S \eta) q_1 q_2}{\rho_1^2 \rho_2^2} + C_S \right) \quad (\text{dB}) \quad (119)$$

où:

$$X_{v1} = (1 + s)^2 \eta \quad (120)$$

$$X_{v2} = (1 - s)^2 \eta \quad (121)$$

$$q_1 = X_{v1}^2 + \rho_1^2 \quad (122)$$

$$q_2 = X_{v2}^2 + \rho_2^2 \quad (123)$$

$$A = (1 - s^2)^2 \quad (124)$$

$$B_S = 6 + 8s^2 + (8(1 - s)X_{v1}^2 \rho_1^2) / q_1^2 + (8(1 + s)X_{v2}^2 \rho_2^2) / q_2^2 + 2(1 - s^2)(1 + 2X_{v1}^2 / q_1)(1 + 2X_{v2}^2 / q_2) \quad (125)$$

$$C_S = 12 \left(\frac{\rho_1 + \sqrt{2}}{\rho_1} \right)^2 \left(\frac{\rho_2 + \sqrt{2}}{\rho_2} \right)^2 \left(\frac{\rho_1 + \rho_2}{\rho_1 + \rho_2 + 2\sqrt{2}} \right) \quad (126)$$

Étape 11-8: Calculer l'affaiblissement dû à la diffusion troposphérique au moyen de l'équation (89).

Cette étape achève la présente section.

12 Variabilité totale sur des trajets transhorizon

On trouvera dans la présente section une présentation de la méthode permettant de calculer la part totale de la variabilité dans l'affaiblissement de transmission de référence médian sur un trajet transhorizon.

Soit:

$h_{r1,2}$: la hauteur du terminal au-dessus du niveau moyen de la mer, en km

p : le pourcentage de temps

f : la fréquence, en MHz

d : la longueur du trajet le long du grand cercle entre les terminaux, en km

A_T : l'affaiblissement prévu soit par diffraction, soit par diffusion troposphérique, en dB

θ_s : l'angle de diffusion, en radians

trouver:

$Y_{total}(p)$: l'affaiblissement total dû à la variabilité, en dB.

Étape 12-1: Calculer la part de la variabilité à long terme pendant le pourcentage de temps p en utilisant la méthode présentée au § 14; puis passer à l'étape 12-2. Utiliser la méthode du § 14 de la manière suivante:

soit:

$h_{r1,2}$: la hauteur du terminal au-dessus du niveau moyen de la mer, en km

d : la longueur du trajet le long du grand cercle entre les terminaux, en km

$d_{r1,2}$: la distance du grand cercle à l'horizon du terminal pour une Terre régulière, en km

f : la fréquence, en MHz

- p : le pourcentage de temps
- $f_{\theta h}$: fixé à la valeur $f_{\theta h} = 1$
- A_T : la prévision d'affaiblissement dû soit à la diffraction, soit à la diffusion troposphérique, en dB

trouver:

- $Y_e(p)$: l'affaiblissement dû à la variabilité à long terme, en dB.

Étape 12-2: Pour combiner correctement les effets de la variabilité à long terme et de la propagation troposphérique par trajets multiples, qui sont toutes les deux des distributions, il convient de calculer la valeur moyenne de la distribution de la variabilité à long terme. Calculer la part de la variabilité à long terme pendant un pourcentage de temps de 50 en utilisant la méthode présentée au § 14; puis passer à l'étape 12-3. Utiliser la méthode du § 14 de la manière suivante:

soit:

- $h_{r1,2}$: la hauteur du terminal au-dessus du niveau moyen de la mer, en km
- d : la longueur du trajet le long du grand cercle entre les terminaux, en km
- $d_{r1,2}$: la distance du grand cercle à l'horizon du terminal pour une Terre régulière, en km
- f : la fréquence, en MHz
- 50: le pourcentage de temps moyen ($p = 50$)
- $f_{\theta h}$: fixé à la valeur $f_{\theta h} = 1$
- A_T : la prévision d'affaiblissement dû soit à la diffraction, soit à la diffusion troposphérique, en dB

trouver:

- $Y_e(50)$: l'affaiblissement dû à la variabilité à long terme, en dB.

Étape 12-3: Pour que les effets de la propagation troposphérique par trajets multiples passent sans discontinuité de la zone en visibilité directe à la zone transhorizon, la valeur de K , à partir de laquelle la propagation troposphérique par trajets multiples est déterminée, devrait être établie au point de transition entre la visibilité directe et la visibilité indirecte. Calculer l'affaiblissement en visibilité directe de la manière présentée au § 6, puis passer à l'étape 12-4. Utiliser la méthode du § 6 de la manière suivante:

soit:

- d_{ML} : la distance maximale en visibilité directe, en km
- d_d : la distance pour laquelle le modèle de diffraction prévoit un affaiblissement de 0 dB, en km, fournie par l'équation (13)
- $h_{r1,2}$: la hauteur du terminal au-dessus du niveau moyen de la mer, en km
- $d_{1,2}$: la distance du grand cercle à l'horizon du terminal pour une Terre régulière, en km
- f : la fréquence, en MHz
- A_{dML} : l'affaiblissement dû à la diffraction à la distance d_{ML} , en dB
- p : le pourcentage de temps
- d : la longueur du trajet concerné

trouver:

- A : l'affaiblissement de transmission de référence, en dB

K_{LOS} : la valeur à employer dans des calculs de variabilité ultérieurs.

Étape 12-4: Calculer la valeur K_t qui permet de déterminer les effets de la propagation troposphérique par trajets multiples. Soit $\theta_{1,5} = 0,02617993878$ radians (1,5 degré).

$$K_t = \begin{cases} 20, \theta_s \geq \theta_{1,5} \\ K_{LOS}, \theta_s \leq 0 \\ (\theta_s(20 - K_{LOS})/\theta_{1,5}) + K_{LOS}, 0 < \theta_s < \theta_{1,5} \end{cases} \quad (127)$$

Étape 12-5: Calculer la part de la propagation troposphérique par trajets multiples pendant le pourcentage de temps p en utilisant la méthode présentée au § 15; puis passer à l'étape 12-6. Utiliser la méthode du § 15 de la manière suivante:

soit:

K_t : la valeur de K_{LOS}

p : le pourcentage de temps

trouver:

$Y_\pi(p)$: la part de la propagation troposphérique par trajets multiples pendant le pourcentage de temps p , en dB.

Étape 12-6: Combiner les effets de la variabilité à long terme avec la propagation troposphérique par trajets multiples pour obtenir la part de la variabilité totale, $Y_{total}(p)$, en utilisant les valeurs précédemment calculées de $Y_e(p)$, $Y_e(50)$ et $Y_\pi(p)$. La moyenne de la propagation troposphérique par trajets multiples $Y_\pi(50) = 0$.

$$Y_{total}(50) = Y_e(50) + Y_\pi(50) \quad (128)$$

$$Y = [(Y_e(p) - Y_e(50))^2 + (Y_\pi(p) - Y_\pi(50))^2]^{0,5} \quad (129)$$

$$Y_{total} = \begin{cases} Y_{total}(50) + Y, & p < 50 \\ Y_{total}(50) - Y, & p \geq 50 \end{cases} \quad (\text{dB}) \quad (130)$$

Cette étape achève la présente section.

13 Variabilité totale sur des trajets en visibilité directe

On trouvera dans la présente section une définition de la manière de calculer la part de la variabilité dans l'affaiblissement de transmission de référence médian.

Soit:

$h_{r1,2}$: la hauteur du terminal au-dessus du niveau moyen de la mer, en km

p : le pourcentage de temps

f : la fréquence, en MHz

d : la longueur du trajet le long du grand cercle entre les terminaux, en km

A_{LOS} : l'affaiblissement prévu, en dB

θ_s : l'angle de diffusion, en radians

$f_{\theta h}$: la valeur d'entrée

trouver:

$Y_{total}(p)$: l'affaiblissement total dû à la variabilité, en dB.

Étape 13-1: Calculer la valeur $f_{\theta h}$ en utilisant la valeur de θ_{h1} précédemment obtenue par les calculs de l'optique des rayons.

$$f_{\theta h} = \begin{cases} 1, \theta_{h1} \leq 0 \\ 0, \theta_{h1} \geq 1 \\ \max(0,5 - (1/\pi) \arctan(20 \log_{10}(32 \theta_{h1})), 0) , \text{ sinon} \end{cases} \quad (131)$$

Étape 13-2: Calculer la part de la variabilité à long terme pour le pourcentage de temps p en utilisant la méthode présentée au § 14; puis passer à l'étape 13-3. Utiliser la méthode du § 14 de la manière suivante:

soit:

- $h_{r1,2}$: la hauteur du terminal au-dessus du niveau moyen de la mer, en km
- d : la longueur du trajet le long du grand cercle entre les terminaux, en km
- $d_{r1,2}$: la distance du grand cercle à l'horizon du terminal pour une Terre régulière, en km
- f : la fréquence, en MHz
- p : le pourcentage de temps
- $f_{\theta h}$: la valeur d'entrée de cette section
- A_{LOS} : l'affaiblissement prévu, en dB

trouver:

- $Y_e(p)$: l'affaiblissement dû à la variabilité à long terme, en dB.

Étape 13-3: Pour combiner correctement les effets de la variabilité à long terme et de la propagation troposphérique par trajets multiples, qui sont toutes les deux des distributions, il convient de calculer la valeur moyenne de la distribution de la variabilité à long terme. Calculer la part de la variabilité à long terme pendant un pourcentage de temps de 50 en utilisant la méthode présentée au § 14; puis passer à l'étape 13-4. Utiliser la méthode du § 14 de la manière suivante:

soit:

- $h_{r1,2}$: la hauteur du terminal au-dessus du niveau moyen de la mer, en km
- d : la longueur du trajet le long du grand cercle entre les terminaux, en km
- $d_{r1,2}$: la distance du grand cercle à l'horizon du terminal pour une Terre régulière, en km
- f : la fréquence, en MHz
- 50: le pourcentage de temps moyen ($p = 50$)
- $f_{\theta h}$: la valeur d'entrée de cette section
- A_{LOS} : l'affaiblissement prévu, en dB

trouver:

- $Y_e(50)$: l'affaiblissement dû à la variabilité à long terme, en dB.

Étape 13-4: Calculer la valeur suivante de K_{LOS} , qui permet de déterminer les effets de la propagation troposphérique par trajets multiples, en utilisant les valeurs de A_Y et R_{Tg} obtenues respectivement au moyen des équations (166) et (61), de la manière suivante:

$$F_{AY} = \begin{cases} 1, A_Y \leq 0 \\ 0,1, A_Y \geq 9 \\ (1,1 + 0,9 \cos(\pi A_Y / 9)) / 2, \text{ sinon} \end{cases} \quad (132)$$

$$F_{\Delta r} = \begin{cases} 1, \Delta r \geq \lambda/2 \\ 0,1, \Delta r \leq \lambda/6 \\ 0,5[1,1 - 0,9 \cos((3\pi/\lambda) (\Delta r - \lambda/6))] , \text{ sinon} \end{cases} \quad (133)$$

$$R_s = R_{Tg} F_{\Delta r} F_{AY} \quad (134)$$

Calculer la valeur de $Y_{\pi}(99)$ de la manière suivante:

$$Y_{\pi}(99) = 10 \log_{10}(f r_{LOS}^3) - 84,26 \quad (\text{dB}) \quad (135)$$

où r_{LOS} est la longueur du trajet du rayon entre les terminaux en visibilité directe calculée lors du tracé du rayon.

Puis utiliser le Tableau 5 pour interpoler la valeur de K correspondant à $Y_{\pi}(99)$ et utiliser cette valeur K pour calculer W_a de la manière suivante:

$$W_a = 10^{0,1K} \quad (136)$$

Une fois W_a connu, achever le calcul de K_{LOS} de la manière suivante:

$$W_R = R_s^2 + 0,01^2 \quad (137)$$

$$W = W_R + W_a \quad (138)$$

$$K_{LOS} = \begin{cases} 0, & W \leq 0 \\ 10 \log_{10} W, & W > 0 \end{cases} \quad (139)$$

Étape 13-5: Calculer la part de la propagation troposphérique par trajets multiples pendant le pourcentage de temps p en utilisant la méthode présentée au § 15; puis passer à l'étape 13-6. Utiliser la méthode du § 15 de la manière suivante:

soit:

K : la valeur attribuée à K_{LOS}

p : le pourcentage de temps

trouver:

$Y_{\pi}(p)$: la part de la propagation troposphérique par trajets multiples pendant le pourcentage de temps p , en dB.

Étape 13-6: Combiner les effets de la variabilité à long terme avec la propagation troposphérique par trajets multiples pour obtenir la part de la variabilité totale, $Y_{total}(p)$, en utilisant les valeurs précédemment calculées de $Y_e(p)$, $Y_e(50)$ et $Y_{\pi}(p)$. La moyenne de la propagation troposphérique par trajets multiples $Y_{\pi}(50) = 0$.

$$Y_{total}(50) = Y_e(50) + Y_{\pi}(50) \quad (140)$$

$$Y = [(Y_e(p) - Y_e(50))^2 + (Y_{\pi}(p) - Y_{\pi}(50))^2]^{0,5} \quad (141)$$

$$Y_{total} = \begin{cases} Y_{total}(50) + Y, & p < 50 \\ Y_{total}(50) - Y, & p \geq 50 \end{cases} \quad (\text{dB}) \quad (142)$$

Cette étape achève la présente section.

14 Variabilité à long terme

On trouvera dans la présente section une description des étapes à suivre pour calculer la distribution statistique de la variabilité à long terme pendant le pourcentage de temps souhaité, p . La variabilité à long terme est fondée sur une distance équivalente normalisée, d_e , qui dépend des distances à

l'horizon des terminaux pour une Terre régulière et d'une distance dépendant de la fréquence¹. Dans cette section, nous utiliserons des paramètres statistiques qui reposent sur des mesures empiriques effectuées sur le long terme.

Soit:

- $h_{r1,2}$: la hauteur du terminal au-dessus du niveau moyen de la mer, en km
- $d_{r1,2}$: la distance du grand cercle à l'horizon du terminal pour une Terre régulière, en km
- p : le pourcentage de temps
- f : la fréquence, en MHz
- d : la longueur du trajet le long du grand cercle entre les deux terminaux, en km
- $f_{\theta h}$: la constante ou le paramètre calculé précédemment, dépendant du type de trajet
- $A_{T,LOS}$: l'affaiblissement prévu par le sous-modèle de visibilité directe, de diffraction ou de dispersion troposphérique (calculé précédemment), en dB

trouver:

- $Y_e(p)$: l'affaiblissement dû à la variabilité à long terme, en dB.

NOTE – Dans la présente section, nous utiliserons à plusieurs reprises la fonction de distribution inverse normale cumulative complémentaire, $Q^{-1}(q)$. On trouvera dans la Recommandation UIT-R P.1057 une technique permettant de trouver sa valeur approximative aux fins de la présente procédure par étapes. La fonction $Q^{-1}(q)$ est définie de telle sorte que $q = p/100$.

Étape 14-1: Calculer d_e , la distance équivalente en kilomètres entre les deux terminaux.

$$d_{qs} = 65(100/f)^{1/3} \quad (\text{km}) \quad (143)$$

$$d_{Lq} = d_{r1} + d_{r2} \quad (\text{km}) \quad (144)$$

$$d_q = d_{Lq} + d_{qs} \quad (\text{km}) \quad (145)$$

$$d_e = \begin{cases} (130 d)/d_q, & d \leq d_q \\ 130 + d - d_q, & d > d_q \end{cases} \quad (\text{km}) \quad (146)$$

Étape 14-2: Calculer g_{10} et g_{90} .

$$g_{10} = \begin{cases} 0,21 \sin(5,22 \log_{10}(f/200)) + 1,28, & f \leq 1600 \\ 1,05, & f > 1600 \end{cases} \quad (147)$$

$$g_{90} = f(x) = \begin{cases} 0,18 \sin(5,22 \log_{10}(f/200)) + 1,23, & f \leq 1600 \\ 1,05, & f > 1600 \end{cases} \quad (148)$$

Étape 14-3: Calculer $V(50)$, $Y_0(10)$ et $Y_0(90)$ en utilisant les équations ci-dessous et les valeurs du Tableau 1.

¹ L'ancienne méthode permettant de calculer les statistiques de la variabilité à long terme était fondée sur l'hypothèse d'une Terre équivalente ayant une réfractivité de 329 unités N. Les études et les essais ont montré que l'utilisation pour ces calculs de l'atmosphère de référence moyenne annuelle pour le monde entier permettait d'obtenir des résultats presque identiques et conférait une description plus physique aux méthodes indiquées.

TABLEAU 1

Valeurs permettant de calculer les équations de la variabilité à long terme

	V(50)	Y ₀ (10)	Y ₀ (90)
c ₁	1,59e-5	5,25e-4	2,93e-4
c ₂	1,56e-11	1,57e-6	3,75e-8
c ₃	2,77e-8	4,70e-7	1,02e-7
n ₁	2,32	1,97	2,00
n ₂	4,08	2,31	2,88
n ₃	3,25	2,90	3,15
f _∞	0,0	5,4	3,2
f _m	3,9	10,0	8,2

$$f_2 = f_\infty + (f_m - f_\infty) \exp(-c_2 d_e^{n_2}) \quad (149)$$

$$\left. \begin{array}{l} V(50) \\ Y_0(10) \\ Y_0(90) \end{array} \right\} = [c_1 d_e^{n_1} - f_2] \exp(-c_3 d_e^{n_3}) + f_2 \quad (\text{dB}) \quad (150)$$

Étape 14-4: Calculer $Y_e(p)$, la variabilité liée à l'évanouissement de puissance à long terme (d'heure en heure) pendant le pourcentage de temps p souhaité.

Si $p = 50$:

$$Y_p = V(50) \quad (\text{dB}) \quad (151)$$

Si $p > 50$:

$$z_{90} = Q^{-1}(90/100) \quad (152)$$

$$z_p = Q^{-1}(p/100) \quad (153)$$

$$c_p = z_p / z_{90} \quad (154)$$

$$Y = c_p(-Y_0(90)g_{90}) \quad (\text{dB}) \quad (155)$$

$$Y_p = Y + V(50) \quad (\text{dB}) \quad (156)$$

si $p < 50$ il faut passer par quelques étapes supplémentaires. Si $p \geq 10$:

$$z_{10} = Q^{-1}(10/100) \quad (157)$$

$$z_p = Q^{-1}(p/100) \quad (158)$$

$$c_p = z_p / z_{10} \quad (159)$$

$$Y = c_p(Y_0(10)g_{10}) \quad (\text{dB}) \quad (160)$$

$$Y_p = Y + V(50) \quad (\text{dB}) \quad (161)$$

Sinon, $1 \leq p < 10$. Utiliser les valeurs du Tableau 2 pour interpoler c_p de manière linéaire à partir de p . Puis appliquer les équations (160) et (161) pour obtenir Y_p .

TABLEAU 2
Valeurs de c_p à faible probabilité

p	c_p
10	1,000 0
5	1,326 5
2	1,716 6
1	1,950 7

Étape 14-5: Calculer Y_{10} , la variabilité liée à l'évanouissement de puissance à long terme (horaire) lorsque $p = 10$.

$$Y_{10} = (Y_0(10)g_{10}) + V(50) \quad (\text{dB}) \quad (162)$$

Étape 14-6: Calculer $Y_{el}(p)$ et $Y_{el}(10)$.

$$Y_{el}(p) = f_{\theta h} Y_p \quad (\text{dB}) \quad (163)$$

$$Y_{el}(10) = f_{\theta h} Y_{10} \quad (\text{dB}) \quad (164)$$

Étape 14-7: Calculer A_Y , qui permet d'éviter que les puissances de signal disponibles ne dépassent dans une proportion irréaliste les niveaux attendus de propagation en espace libre lorsque la variabilité autour de la médiane est importante et qu'elle est proche de son niveau en espace libre.

$$A_{YI} = Y_{el}(10) - A_T - 3 \quad (\text{dB}) \quad (165)$$

$$A_Y = \max(A_{YI}, 0) \quad (\text{dB}) \quad (166)$$

Étape 14-8: Si $p \geq 10$, calculer l'affaiblissement total dû à la variabilité; la présente section est alors achevée. Sinon, passer à l'étape 14-9 et poursuivre.

$$Y_e(p) = Y_{el}(p) - A_Y \quad (\text{dB}) \quad (167)$$

Étape 14-9: Pour des pourcentages de temps inférieurs à 10%, il peut être nécessaire de procéder à une correction supplémentaire. Calculer la valeur de Y_{temp} .

$$Y_{temp} = Y_{el}(p) - A_Y - A_{T,LOS} \quad (\text{dB}) \quad (168)$$

Étape 14-10: Utiliser le Tableau 3 pour interpoler c_{Yp} de manière linéaire à partir de p .

TABLEAU 3
Valeurs de correction à faible probabilité

p	c_{Yp}
10	0,00
5	-3,70
2	-4,50
1	-5,00

Étape 14-11: Calculer l'affaiblissement total dû à la variabilité.

$$Y_e(p) = \begin{cases} -c_{Yp} + A_{T,LOS}, & Y_{temp} > -c_{Yp} \\ Y_{temp} + A_{T,LOS}, & \text{sinon} \end{cases} \quad (169)$$

Cette étape achève la présente section.

15 Propagation troposphérique par trajets multiples

On trouvera dans la présente section une description de la manière de calculer la part de la variabilité totale due à la propagation troposphérique par trajets multiples.

Soit:

K : le paramètre d'entrée

p : le pourcentage de temps

trouver:

$Y_{\pi}(p)$: la part de la propagation troposphérique par trajets multiples pour le pourcentage de temps p , en dB.

La présente section repose sur l'emploi d'un tableau de données correspondant à la distribution de Nakagami-Rice. Les données du Tableau 4 sont établies pour $p < 50$ et celles du Tableau 5 sont établies pour $p > 50$. Pour toutes les valeurs de $p = 50$, $Y_{\pi}(p) = 0$ dB.

TABLEAU 4

Valeurs de la distribution de Nakagami-Rice pendant un faible pourcentage de temps

K	$Y_{\pi}(1)$	$Y_{\pi}(2)$	$Y_{\pi}(5)$	$Y_{\pi}(10)$	$Y_{\pi}(15)$	$Y_{\pi}(20)$	$Y_{\pi}(30)$	$Y_{\pi}(40)$
-40	-0,1417	-0,1252	-0,1004	-0,0784	-0,0634	-0,0515	-0,0321	-0,0155
-25	-0,7676	-0,6811	-0,5497	-0,4312	-0,3504	-0,2856	-0,1790	-0,0870
-20	-1,3183	-1,1738	-0,9524	-0,7508	-0,6121	-0,5003	-0,3151	-0,1537
-18	-1,6263	-1,4507	-1,1805	-0,9332	-0,7623	-0,6240	-0,3940	-0,1926
-16	-1,9963	-1,7847	-1,4573	-1,1557	-0,9462	-0,7760	-0,4916	-0,2410
-14	-2,4355	-2,1829	-1,7896	-1,4247	-1,1695	-0,9613	-0,6113	-0,3007
-12	-2,9491	-2,6507	-2,1831	-1,7455	-1,4375	-1,1846	-0,7567	-0,3737
-10	-3,5384	-3,1902	-2,6407	-2,1218	-1,7535	-1,4495	-0,9307	-0,4619
-8	-4,1980	-3,7974	-3,1602	-2,5528	-2,1180	-1,7565	-1,1345	-0,5662
-6	-4,9132	-4,4591	-3,7313	-3,0306	-2,5247	-2,1011	-1,3655	-0,6855
-4	-5,6559	-5,1494	-4,3315	-3,5366	-2,9578	-2,4699	-1,6150	-0,8154
-2	-6,3810	-5,8252	-4,9219	-4,0366	-3,3871	-2,8364	-1,8638	-0,9455
0	-7,0247	-6,4249	-5,4449	-4,4782	-3,7652	-3,1580	-2,0804	-1,0574
2	-7,5229	-6,8862	-5,8424	-4,8090	-4,0446	-3,3927	-2,2344	-1,1347
4	-7,8532	-7,1880	-6,0963	-5,0145	-4,2145	-3,5325	-2,3227	-1,1774
6	-8,0435	-7,3588	-6,2354	-5,1234	-4,3022	-3,6032	-2,3656	-1,1975
20	-8,2238	-7,5154	-6,3565	-5,2137	-4,3726	-3,6584	-2,3979	-1,2121

TABLEAU 5

Valeurs de la distribution de Nakagami-Rice pendant un pourcentage de temps élevé

K	$Y_{\pi}(60)$	$Y_{\pi}(70)$	$Y_{\pi}(80)$	$Y_{\pi}(85)$	$Y_{\pi}(90)$	$Y_{\pi}(95)$	$Y_{\pi}(98)$	$Y_{\pi}(99)$
-40	0,0156	0,0323	0,0518	0,0639	0,0791	0,1016	0,1271	0,1441
-25	0,0878	0,1828	0,2953	0,3651	0,4537	0,5868	0,7390	0,8420
-20	0,1564	0,3269	0,5308	0,6585	0,8218	1,0696	1,3572	1,5544
-18	0,1969	0,4127	0,6722	0,8355	1,0453	1,3660	1,7417	2,0014
-16	0,2478	0,5209	0,8519	1,0615	1,3326	1,7506	2,2463	2,5931
-14	0,3114	0,6573	1,0802	1,3505	1,7028	2,2526	2,9156	3,3872
-12	0,3903	0,8281	1,3698	1,7198	2,1808	2,9119	3,8143	4,4714
-10	0,4874	1,0404	1,7348	2,1898	2,7975	3,7820	5,0373	5,9833
-8	0,6045	1,2999	2,1887	2,7814	3,5868	4,9288	6,7171	8,1319
-6	0,7415	1,6078	2,7374	3,5059	4,5714	6,4060	8,9732	11,0973
-4	0,8935	1,9530	3,3611	4,3363	5,7101	8,1216	11,5185	14,2546
-2	1,0458	2,2979	3,9771	5,1450	6,7874	9,6276	13,4690	16,4251
0	1,1723	2,5755	4,4471	5,7363	7,5266	10,5553	14,5401	17,5511
2	1,2535	2,7446	4,7144	6,0581	7,9073	11,0003	15,0270	18,0526
4	1,2948	2,8268	4,8377	6,2021	8,0724	11,1869	15,2265	18,2566
6	1,3130	2,8619	4,8888	6,2610	8,1388	11,2607	15,3047	18,3361
20	1,3255	2,8855	4,9224	6,2992	8,1814	11,3076	15,3541	18,3864

Étape 15-1: En utilisant les Tableaux 4 et 5, effectuer une interpolation linéaire pour déterminer $Y_{\pi}(p)$ pour les valeurs souhaitées de K et de p , en gardant à l'esprit que $Y_{\pi}(0) = 0$.

Cette étape achève la présente section.

Annexe 3

Résultats expérimentaux

Des essais de propagation à 930 MHz sur des trajets air vers sol ont été effectués au Japon en novembre 1982, ainsi qu'en avril et en juin 1983. D'après les résultats, l'affaiblissement de propagation sur un trajet en visibilité directe présentait une bonne concordance avec l'affaiblissement en espace libre. La distance en visibilité directe calculée à partir des données de mesure était, à une altitude de 10 000 m, plus courte que la distance estimée.