

RECOMMANDATION UIT-R S.1553

Méthode envisageable pour prendre en compte les effets environnementaux et autres sur les diagrammes d'antenne de satellite

(Question UIT-R 236/4)

(2002)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que les effets environnementaux et autres sont des éléments importants de la détermination des caractéristiques de fonctionnement d'une antenne de satellite en fin de vie;
- b) que les niveaux des lobes latéraux d'une antenne de satellite peuvent varier en fonction de facteurs environnementaux et opérationnels, et du vieillissement;
- c) que le diagramme de rayonnement d'une antenne de satellite est un paramètre important pour les calculs de brouillage;
- d) qu'on équipe de plus en plus les satellites d'antennes-réseau actives dans l'environnement des satellites;
- e) que les méthodes d'évaluation des effets de l'environnement sur la qualité de fonctionnement d'une antenne de satellite dépendent de la technologie d'antenne utilisée;
- f) que, dans certains systèmes, les brouillages causés à une station terrienne ont pour principale origine les lobes latéraux de l'antenne du satellite,

reconnaissant

- a) que la procédure exacte et les facteurs d'erreur peuvent varier en fonction de l'architecture de l'engin spatial et de sa charge utile,

recommande

1 d'employer les méthodes et les informations présentées en Annexe 1 pour aider les concepteurs de systèmes à satellites à déterminer et évaluer les variations des diagrammes de rayonnement des antennes de satellite en fonction de l'angle par rapport à l'axe de visée du satellite.

ANNEXE 1

1 Introduction

Les analyses effectuées sur des antennes pour garantir leurs caractéristiques en fin de vie ne dépendent pas de l'orbite de l'engin spatial (géostationnaire ou non) mais du type d'antenne (actif ou passif) utilisé.

Dans les deux cas, les principes généraux guidant les essais sont toutefois les mêmes:

- le comportement du diagramme de rayonnement est testé dans des conditions de gradient de température dégradées;
- la dégradation maximale est évaluée au moyen de simulations validées;
- les caractéristiques de fonctionnement en fin de vie sont déterminées au moyen d'une combinaison des deux facteurs ci-dessus.

La présente Annexe contient quelques précisions sur cette méthode générale d'évaluation des caractéristiques de fonctionnement d'une antenne.

Il convient d'apporter certaines précisions concernant les termes utilisés pour décrire les antennes:

- une antenne passive est une antenne dans laquelle le composant rayonnant ne comporte aucun équipement actif (amplificateurs de puissance à semi-conducteur, à faible bruit, à tube à ondes progressives ou autre). La fonction d'amplification est centralisée et est intégrée dans le répéteur. Les antennes passives sont les plus utilisées; on peut les associer à une mécanique de pointage pour obtenir une couverture mobile;
- l'antenne active est un sous-système dans lequel les éléments actifs sont intégrés entre les éléments rayonnants du réseau de modelage du faisceau. Cette technique permet de générer des faisceaux multiples reconfigurables.

Un des principes fondamentaux de la théorie des antennes actives est que le diagramme de rayonnement est déterminé par la distribution de l'amplitude et de la phase en fonction de l'ouverture. Le concepteur de l'antenne peut, en principe, optimiser les lois d'illumination et escompter que le diagramme de rayonnement résultant sera tel que prévu. Dans la pratique, toutefois, il y aura des erreurs inévitables et le diagramme de rayonnement réel sera, dans une certaine mesure, différent du diagramme théorique.

2 Antennes passives

Les principales architectures d'antenne passive sont basées sur les antennes à réflecteur, à savoir un réflecteur parabolique illuminé par un système d'alimentation primaire ou réflecteur secondaire situé au foyer ou près du réflecteur principal.

Les caractéristiques de rayonnement de l'antenne sont influencées par les distorsions mécaniques et thermiques qui produisent essentiellement une légère déformation du réflecteur et ont ainsi une incidence sur les lois d'illumination.

Ces distorsions mécaniques et thermiques apparaissent en deux occasions:

- pendant la fabrication du réflecteur: la surface effective est différente de la surface théorique,
- pendant la durée de vie de l'antenne: l'environnement du satellite est à l'origine de certaines déformations mécaniques et thermiques qui modifient la géométrie de l'antenne et donc ses caractéristiques de rayonnement.

Ces effets se traduisent par une élévation du niveau des lobes latéraux, une réduction du gain dans l'axe et, à un degré moindre, une erreur de direction du faisceau principal.

Les erreurs résultant de déformations mécaniques ou thermiques sont prévisibles, et le diagramme de rayonnement qui en résulte peut être calculé par des méthodes classiques à partir des caractéristiques de la mission, de l'architecture du satellite et de la configuration de l'antenne.

Dès que la configuration de l'antenne est arrêtée, les différentes étapes de l'analyse pour garantir les caractéristiques de fonctionnement en fin de vie sont les suivantes:

- caractérisation des erreurs de fabrication par rapport à la forme théorique (calcul de l'écart quadratique moyen);
- correction du modèle d'antenne compte tenu de ces erreurs;
- mesure des caractéristiques de rayonnement de l'antenne à la température ambiante et corrélation avec la modélisation;

- recherches au niveau des environnements thermiques et mécaniques entraînant la distorsion de l'antenne la plus forte (distorsion quadratique moyenne la plus défavorable);
- prévision du diagramme d'antenne en fin de vie par analyse.

Les paramètres de fonctionnement qui sont soumis aux essais à température ambiante font apparaître certaines marges par rapport aux spécifications, et l'analyse indiquée ci-dessous servira à confirmer que ces marges sont suffisantes pour garantir ses performances jusqu'à la fin de la durée de vie prévue.

3 Antennes actives

L'évaluation ou la prévision des caractéristiques de fonctionnement des antennes-réseau en présence de variations d'excitation des éléments (dues à des facteurs environnementaux ou opérationnels, y compris les défaillances) est un aspect important des efforts techniques qu'il faut déployer pour le développement d'antennes à hautes performances destinées à fonctionner en orbite. Dans le contexte du processus technique, on détermine des bilans d'erreur pour définir les caractéristiques de fonctionnement de l'antenne sur toute la durée de vie du satellite.

Un diagramme de rayonnement effectif d'antenne active s'écartera du diagramme théorique en raison de la dispersion des caractéristiques entre les chaînes d'éléments actifs qui produisent une distorsion des lois d'illumination en phase et en amplitude, ces distorsions sont généralement englobées sous le terme erreur A/ϕ .

On observe deux types d'erreur selon leur nature prévisible ou aléatoire.

- Les erreurs prévisibles (telles que la reproductibilité, l'assemblage et les défauts de gradient thermique) qui peuvent être compensées par un étalonnage de l'antenne en des points d'étalonnage (fréquence et/ou température) au niveau de l'équipement. La dispersion de ces erreurs sur la plage de fréquences et/ou la plage de températures ne sera pas compensée et ferait alors partie du bilan A/ϕ .
- Les erreurs aléatoires sont causées par des écarts accidentels des valeurs de paramètre d'antenne par rapport aux valeurs nominales. Ces écarts surviennent dès le début (en raison des dispersions caractéristiques de chacun des équipements et des équipements entre eux) et évoluent tout au long de la durée de vie pour atteindre finalement les caractéristiques de fonctionnement de fin de vie. Même très petits, ces écarts peuvent influencer les caractéristiques de gain du faisceau principal et des lobes principaux.

On peut identifier trois éléments dans l'analyse du bilan A/ϕ , à savoir:

- l'erreur d'étalonnage A/ϕ aux points d'étalonnage;
- les dispersions A/ϕ sur la gamme de fréquences et/ou la gamme de températures;
- les dispersions A/ϕ sur la durée de vie.

Ces trois éléments, combinés dans une analyse statistique, serviront:

- à comparer les diagrammes d'antenne mesurés avec les diagrammes théoriques dans un ensemble de conditions d'essai restreint (température ambiante, quelques fréquences, ...);
- pour confirmer que les marges (par rapport aux spécifications) utilisées dans l'ensemble de conditions d'essai restreint sont suffisantes pour garantir les caractéristiques de fonctionnement au cours de la durée de vie du satellite.

La présente section identifie les paramètres qui agissent sur les caractéristiques de fonctionnement de l'antenne et propose une méthode pour évaluer les variations des lobes latéraux pour chaque direction de pointage. Ces variations pourront ensuite être utilisées pour calculer un diagramme de gain d'antenne qui ne sera pas dépassé pour un niveau de confiance donné.

Les Fig. 1 et 2 sont des exemples d'antennes-réseau avec et sans erreur de phase et d'amplitude des éléments. Les figures de droite représentent le diagramme avec une variation de phase de 1° et une variation d'amplitude de 1 dB par élément du réseau. Les deux diagrammes ont été obtenus avec un faisceau rectangulaire ayant des éléments espacés de $0,9 \lambda$.

FIGURE 1

Antenne-réseau à faible gain avec et sans erreur de phase et d'amplitude

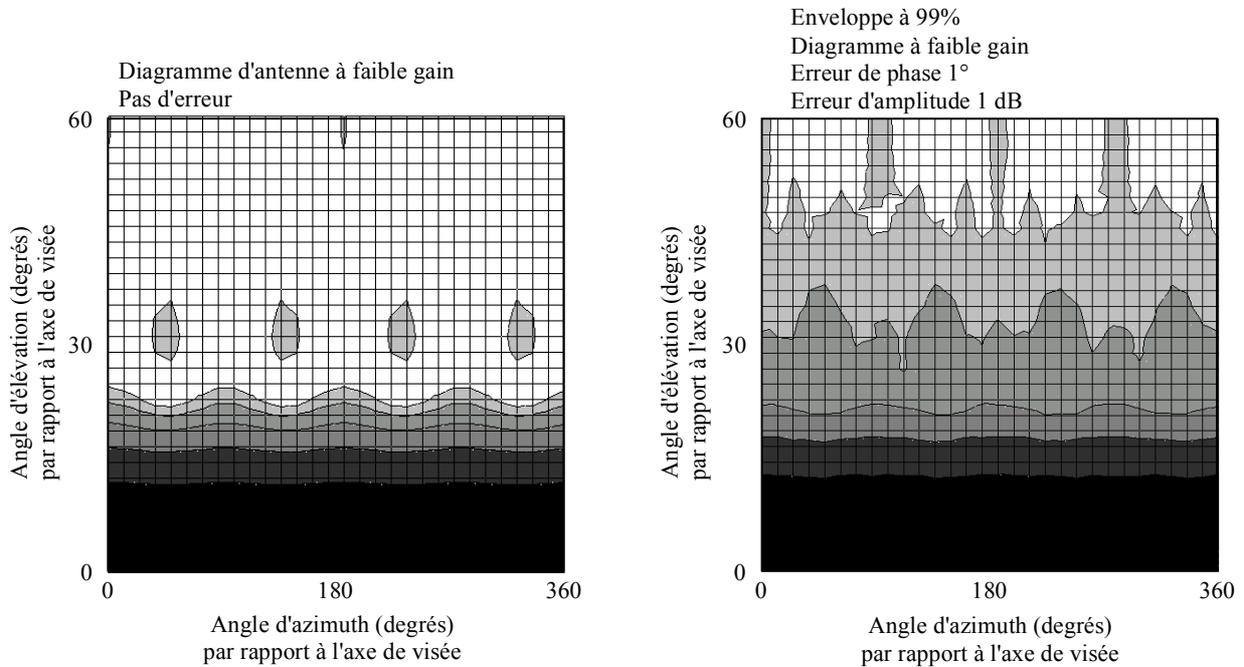
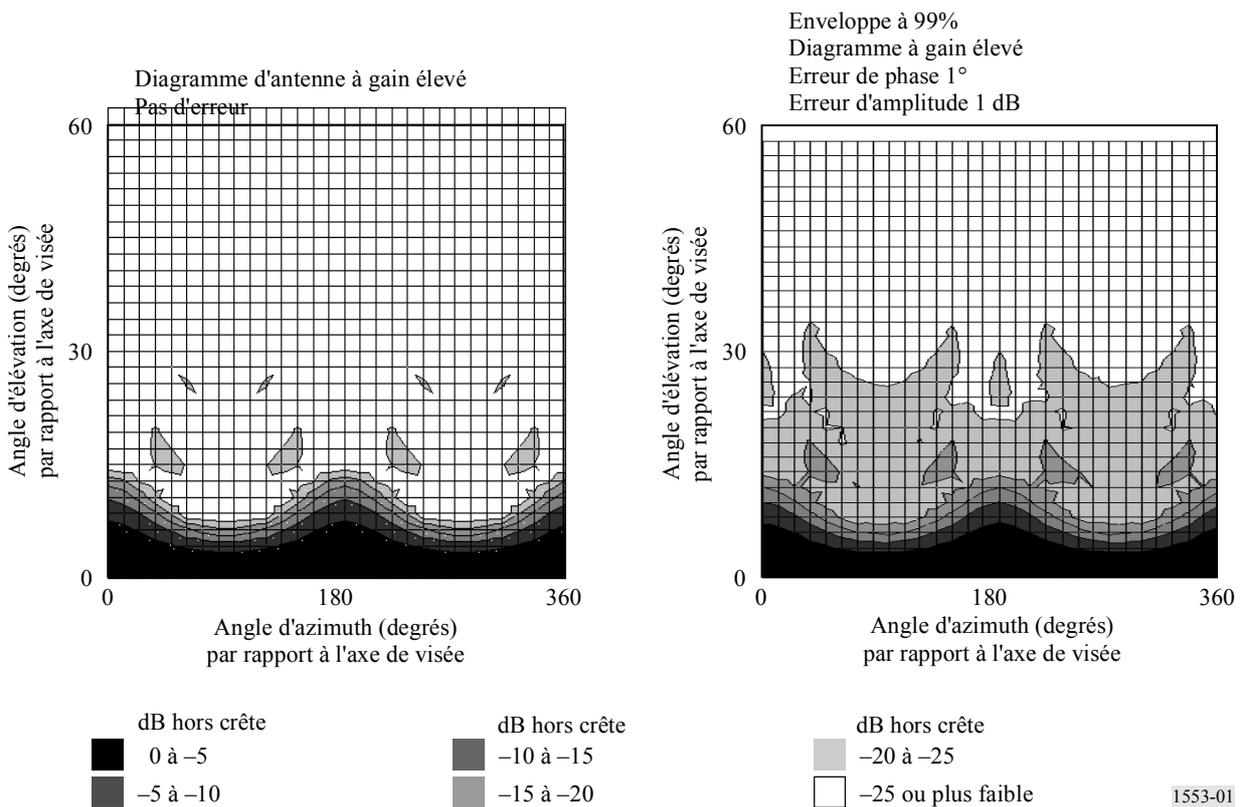


FIGURE 2

Antenne-réseau à gain élevé avec et sans erreur de phase et d'amplitude



3.1 Méthode utilisée

Les erreurs aléatoires sont causées par des écarts accidentels de la valeur des paramètres d'antenne par rapport à leur valeur nominale. Elles sont toujours présentes et, même très petites, peuvent limiter le niveau minimal des lobes latéraux qu'il est possible d'atteindre. On ne connaît pas toujours la nature statistique exacte des erreurs aléatoires pouvant apparaître dans un modèle d'antenne donnée, mais la présente méthode accepte toute description statistique.

Pour calculer les effets des erreurs aléatoires des antennes-réseau, il faut simuler les paramètres aléatoires de chaque élément du réseau. Ainsi le champ E de chaque élément est calculé avec une instance de chaque source d'erreur aléatoire. La somme des champs E de chaque élément fournit les informations de diagramme d'antenne dans chaque direction de pointage.

La simulation est effectuée un grand nombre de fois, avec des présences différentes de sources d'erreur aléatoires. Un histogramme du gain d'antenne est établi pour chaque direction de pointage de l'antenne. A partir de cette information, on peut déterminer le niveau de gain qui ne sera pas dépassé pour un niveau de confiance spécifié.

La première étape de l'évaluation de l'antenne est l'identification et la mise en tableau des paramètres aléatoires qui influencent les caractéristiques de fonctionnement. Chaque paramètre peut être mis en oeuvre au moyen d'un générateur de nombres aléatoires produisant de telles variances en fonction de leur description statistique. La deuxième étape est l'application des équations qui représentent le diagramme d'antenne et la dernière étape est l'établissement d'un histogramme de gain pour chaque direction de pointage.

3.2 Paramètres qui influencent les caractéristiques de fonctionnement de l'antenne

Le diagramme de rayonnement d'une antenne-réseau peut s'écarter du diagramme souhaité par suite d'erreurs de phase des éléments, d'erreurs d'amplitude, de défaillance de certains éléments, d'erreurs de polarisation ou d'erreurs de pointage mécanique. Dans la présente section, tous les éléments contribuant aux erreurs aléatoires sont énumérés et accompagnés d'une description statistique.

3.2.1 Bilans d'erreur d'amplitude et de phase

Chaque composant d'une antenne présente des caractéristiques de fonctionnement qui varient en fonction des tolérances de fabrication (M_{tol}), de la température, de la fréquence et de l'âge. En plus, certains dispositifs commandés numériquement peuvent être sujets à des erreurs de quantification. Le Tableau 1 est un modèle de tableau couramment utilisé pour les bilans. Le modèle s'applique aux variations de phase ou d'amplitude. Selon l'architecture de l'antenne, on peut ajouter ou supprimer des sources d'erreur.

Les variations d'amplitude et de phase sont généralement modélisées par des erreurs aléatoires à distribution gaussienne. Même si certaines sources d'erreur individuelles ne sont pas nécessairement gaussiennes, on peut raisonnablement supposer que la somme est gaussienne en vertu du théorème de la limite centrale. Etant donné que seule la somme est utilisée dans les calculs finaux, cette approximation est raisonnable.

Si les erreurs sont modélisées comme étant gaussiennes, l'écart type de la phase et de la valeur de chaque paramètre apparaît dans le bilan d'erreur. On calcule généralement l'écart type d'erreur total en prenant la racine carrée de la somme des variances d'erreur. Cela suppose que les brouilleurs individuels ne sont pas corrélés.

La distribution des erreurs d'amplitude finale (tenant compte de toutes les sources d'erreur du Tableau 1) est une moyenne gaussienne nulle, avec $\sigma = \sigma_a$, donnée par $G(0, \sigma_a)$. On peut supposer que la distribution des phases finale sera $G(0, \sigma_p)$ si les sources d'erreur de la phase sont modérées.

TABLEAU 1

Modèle de tableau pour les calculs de bilan d'erreur présentant la variation des erreurs d'amplitude ou de phase d'une antenne-réseau

Source d'erreur	M_{Tot}	Température	Fréquence	Temps (fin de vie)
Total des sommes quadratiques de la distribution de puissance RF – Diviseur de colonne – Diviseur de rangée – Transition				
Total des sommes quadratiques des équipements électroniques RF – Transition – Déphaseur – Etage d'excitation – Amplificateur final – Puissance demandée à l'amplificateur – Variation de l'alimentation électrique – Transition				
Total des sommes quadratiques d'hyperfréquences passives – Filtre – Polariseur – Élément rayonnant				
Total général des sommes quadratiques				

Cette méthode peut couvrir les erreurs aléatoires qui ne sont pas gaussiennes. Si les erreurs aléatoires ne sont pas corrélées, chaque variable aléatoire peut être calculée séparément et l'erreur totale est, dans ce cas, la somme des composantes individuelles. Pour cette raison, si les variables

aléatoires sont $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$, la variation aléatoire d'erreur totale est $\sum_{i=1}^N x_i$.

Si l'on dispose des informations de corrélation (à partir des mesures), il faut en tenir compte. On peut le faire en utilisant des bilans d'erreur additionnels. Par exemple, il est probable qu'il y aura une certaine corrélation des paramètres en fonction de la température. Les données mesurées peuvent être utilisées pour établir un bilan d'erreur individuel pour chaque température de fonctionnement. Les caractéristiques de fonctionnement peuvent ensuite être mises en relation avec chaque température de fonctionnement.

Les valeurs M_{tot} représentent les variations de gain ou de phase entre les trajets dans le réseau tel qu'il se présente après fabrication et étalonnage. Les variations de température sont généralement diurnes et les variations de fréquence sont considérées sur l'ensemble de la gamme de fréquences d'utilisation du système à satellites. Les effets de fin de vie sont la conséquence du vieillissement des dispositifs électroniques.

3.2.2 Défaillances

Une défaillance d'un élément peut survenir en tout point de l'antenne-réseau. Il convient de spécifier la probabilité de défaillance d'un élément pendant la durée de vie du satellite. Les statistiques sont généralement modélisées sous forme de distribution de Bernoulli. Si l'on sait que les défaillances des éléments présentent une distribution différente, on peut en tenir compte comme indiqué au § 3.1.

3.2.3 Erreur de pointage mécanique

On peut décrire l'erreur de pointage au moyen de deux variables aléatoires ε_θ et ε_φ correspondant à l'erreur dans les termes θ et φ d'un système de coordonnées sphériques.

3.2.4 Polarisation

Chaque élément peut présenter une erreur de polarisation. Celle-ci est spécifiée par le rapport entre l'angle d'inclinaison et le taux d'ellipticité. Leurs distributions peuvent être modélisées comme des variables aléatoires gaussiennes représentées par la moyenne et les variances $G(m_\tau, \sigma_\tau)$ pour l'erreur d'angle d'inclinaison et $G(m_r, \sigma_r)$ pour l'erreur de taux d'ellipticité. D'autres distributions peuvent être acceptées.

4 Description mathématique de lobes latéraux présentant des erreurs

La présente section traite de l'expression du diagramme de gain compte tenu des erreurs. L'équation finale peut être utilisée dans une simulation des composantes d'erreur aléatoires pour élaborer les histogrammes de gain d'antenne.

Le champ électrique pour un élément d'antenne-réseau est donnée par l'équation (1):

$$\begin{aligned} E_{\theta_i}(\theta, \varphi) &= A_i(\theta, \varphi)[r_{A_i}(\theta, \varphi) \cos(\tau_{A_i}(\theta, \varphi)) + j \sin(\tau_{A_i}(\theta, \varphi))] \\ E_{\varphi_i}(\theta, \varphi) &= A_i(\theta, \varphi)[-r_{A_i}(\theta, \varphi) \sin(\tau_{A_i}(\theta, \varphi)) + j \cos(\tau_{A_i}(\theta, \varphi))] \end{aligned} \quad (1)$$

où:

$E_{\theta_i}(\theta, \varphi)$: champ électrique (V/m en supposant une sphère de rayon unitaire) du $i^{\text{ème}}$ élément pointant dans la direction θ

$E_{\varphi_i}(\theta, \varphi)$: champ électrique (V/m en supposant une sphère de rayon unitaire) du $i^{\text{ème}}$ élément pointant dans la direction φ .

θ et φ représentent les deux coordonnées d'un système de coordonnées sphériques. On suppose que celui-ci est centré sur le foyer de l'antenne. L'orientation du système de coordonnées par rapport au type d'antenne est arbitraire. Les coordonnées sphériques utilisent trois variables (θ , φ , r) pour situer un point dans l'espace. La conversion de coordonnées sphériques en coordonnées rectangulaires s'obtient par:

$$x = r \sin(\theta) \cos(\varphi)$$

$$y = r \sin(\theta) \sin(\varphi)$$

$$z = r \cos(\theta)$$

A chaque point (θ, φ, r) , un vecteur (x, y, z) dans la direction θ est défini comme étant:

$$x = \cos(\theta) \cos(\varphi)$$

$$y = \cos(\theta) \sin(\varphi)$$

$$z = -\sin(\theta)$$

La direction φ est définie comme étant:

$$x = -\sin(\varphi)$$

$$y = \cos(\varphi)$$

$$z = 0$$

La conversion de coordonnées rectangulaires en coordonnées atmosphériques s'obtient par:

$$r = (x^2 + y^2 + z^2)^{0,5}$$

$$\varphi = \text{tg}^{-1}(y/x)$$

$$\theta = \cos^{-1}(z/r)$$

Si l'on remplace r par 1, les coordonnées (θ, φ) représentent une direction.

$E(\theta, \varphi)$ est le champ E dans la direction θ, φ . On peut représenter, dans une direction donnée, un champ E au moyen de trois composantes orthogonales complexes données par E_θ, E_φ et E_r . Toutefois, à mesure qu'une onde électromagnétique se propage dans l'espace, le terme E_r devient voisin de 0. La notation utilisée ci-dessus représente les deux composantes de champ E restantes dans la direction θ, φ . La phase et la grandeur relatives de ces deux composantes définissent la polarisation. Par exemple, si $|E_\theta| = |E_\varphi|$ et qu'ils sont déphasés de 90° , l'onde électromagnétique aura une polarisation circulaire.

$A_i(\theta, \varphi)$: signal élémentaire transmis complexe (rapport V/m en supposant une sphère de rayon unitaire) comme une fonction de θ, φ pour le $i^{\text{ème}}$ élément sans erreur.

$r_{A_i}(\theta, \varphi)$: taux d'ellipticité axial transmis comme une fonction de θ, φ pour le $i^{\text{ème}}$ élément sans erreur.

$\tau_{A_i}(\theta, \varphi)$: angle d'inclinaison transmis par une fonction de θ, φ pour le $i^{\text{ème}}$ élément sans erreur.

Les erreurs aléatoires décrites ci-dessus faussent l'expression du champ dans l'équation (1). L'erreur de pointage mécanique est ajoutée en premier. Comme indiqué ci-dessus, il faut deux variables aléatoires pour décrire l'erreur de pointage. A partir de la spécification de la variation des erreurs et en supposant que les variables aléatoires ont une distribution gaussienne à moyenne zéro, on peut former des variables aléatoires. On peut transformer ces erreurs de manière à pouvoir calculer une instance de l'erreur dans la direction de pointage (θ, φ) de l'antenne. L'expression du champ avec erreur de pointage mécanique est donnée par l'équation (2).

$$\hat{E}_{\theta_i} = E_{\theta_i}((\theta + \varepsilon_\theta); (\varphi + \varepsilon_\varphi))$$

$$\hat{E}_{\varphi_i} = E_{\varphi_i}((\theta + \varepsilon_\theta); (\varphi + \varepsilon_\varphi)) \quad (2)$$

où:

\hat{E}_{θ_i} : champ électrique du $i^{\text{ème}}$ élément pointant dans la direction θ et englobant une erreur de pointage mécanique

\hat{E}_{φ_i} : champ électrique du $i^{\text{ème}}$ élément pointant dans la direction φ et englobant une erreur de pointage mécanique

ε_θ : instance de l'erreur de pointage mécanique aléatoire dans la direction θ

ε_φ : instance de l'erreur de pointage mécanique aléatoire dans la direction φ .

Le membre de gauche de l'équation (2) ne fait pas ressortir explicitement (θ, φ) ou l'erreur de pointage mécanique. Pour rendre ces équations plus concises, la direction et l'erreur de pointage ne seront plus montrées par la suite.

Le champ électrique pour un élément du réseau y compris toutes les erreurs est donné par l'équation (3):

$$\begin{aligned} E'_{\theta_i} &= P_i A_i (1 + \varepsilon_{a_i}) [r_{A_i} (1 + \varepsilon_{r_i}) \cos(\tau_{A_i} + \partial_{\tau_i}) + j \sin(\tau_{A_i} + \partial_{\tau_i})] e(-j\partial_p) \\ E'_{\varphi_i} &= P_i A_i (1 + \varepsilon_{a_i}) [-r_{A_i} (1 + \varepsilon_{r_i}) \sin(\tau_{A_i} + \partial_{\tau_i}) + j \cos(\tau_{A_i} + \partial_{\tau_i})] e(-j\partial_p) \end{aligned} \quad (3)$$

où:

E'_{θ_i} : champ électrique du $i^{\text{ème}}$ élément dans la direction θ avec erreurs

E'_{φ_i} : champ électrique du $i^{\text{ème}}$ élément dans la direction φ avec erreurs

P_i : 1 ou 0. La probabilité que $P_i = 1$ est la probabilité que le $i^{\text{ème}}$ élément ne soit pas défaillant

ε_{a_i} : instance de l'erreur d'amplitude relative avec distribution $G(0, \sigma_a)$ pour le $i^{\text{ème}}$ élément

ε_{r_i} : instance de l'erreur de rapport axial relatif avec distribution $G(0, \sigma_r)$ pour le $i^{\text{ème}}$ élément

∂_{τ_i} : instance de l'erreur d'angle d'inclinaison avec distribution $G(0, \sigma_\tau)$ pour le $i^{\text{ème}}$ élément

∂_p : instance de l'erreur de phase avec distribution $G(0, \sigma_p)$ pour le $i^{\text{ème}}$ élément

Le champ électrique total pour le diagramme d'antenne est la somme des champs des éléments, conformément à l'équation (4).

$$\begin{aligned} E_\theta &= \sum_{i=1}^N E'_{\theta_i} e^{j2\pi(D \cdot L_i)/\lambda} \\ E_\varphi &= \sum_{i=1}^N E'_{\varphi_i} e^{j2\pi(D \cdot L_i)/\lambda} \end{aligned} \quad (4)$$

où:

E_θ : champ électrique total dans la direction θ avec erreurs

E_φ : champ électrique total dans la direction φ avec erreurs

N : nombre d'éléments

D : $(x,y,z) = (\sin(\theta) \cos(\varphi), \sin(\theta) \sin(\varphi), \cos(\theta)) =$ vecteur unitaire dans la direction de (θ, φ)

L_i : emplacement (x,y,z) du $i^{\text{ème}}$ élément (L_i peut être défini dans tout système de coordonnées inertiel)

λ : longueur d'onde.

$$G(\theta, \varphi) = 10 \log_{10}(E_{\theta}^2 + E_{\varphi}^2) - MaxField \quad (5)$$

où:

$$MaxField = 10 \log(Max_{All\theta\varphi}(E_{\theta}^2 + E_{\varphi}^2)) \quad \text{pour } E_{\varphi} \text{ et } E_{\theta} \text{ calculés sans erreur}$$

G : gain d'antenne (dB) calculé par rapport au gain de crête, sans erreur.

5 Méthode de calcul de la limite de fiabilité de $X\%$ d'un diagramme de gain d'antenne

On peut calculer une limite de fiabilité de $X\%$ du diagramme d'une antenne au moyen d'une simulation de Monte Carlo. On procédera de la manière suivante pour calculer un diagramme limité correspondant à une limite de fiabilité de $X\%$.

Etape 1: Calculer l'amplitude σ_a et les variances de phase σ_p (et les valeurs moyennes si elles s'appliquent) compte tenu des valeurs du Tableau 1.

Etape 2: Déterminer les distributions des erreurs pour (ε_{θ} , ε_{φ} , P_i , ε_{a_i} , ε_{r_i} , $\partial\tau_i$, ∂_p)

Etape 3: Produire des nombres aléatoires indépendants (gaussiens ou binaires) pour chaque variable aléatoire (ε_{θ} , ε_{φ} , P_i , ε_{a_i} , ε_{r_i} , $\partial\tau_i$, ∂_p) dans chaque élément du réseau.

Etape 4: Additionner les éléments individuels comme indiqué dans l'équation (5) pour calculer une seule instance de gain pour la direction (θ , φ) donnée.

Etape 5: Enregistrer un histogramme de niveau de gain.

Etape 6: Répéter Y fois les étapes 3 à 5 en utilisant chaque fois une variable aléatoire indépendante. La valeur de Y doit être suffisante pour garantir que le pourcentage puisse être calculé avec une précision raisonnable.

Etape 7: Intégrer et normaliser (diviser par la valeur maximale) l'histogramme pour déterminer la fonction de distribution cumulative. La limite de $X\%$ pour la direction (θ , φ) est le point $X\%$ de la courbe de la fonction de distribution cumulative.

Etape 8: Répéter les étapes 3 à 6 jusqu'à ce que toutes les directions aient fait l'objet d'une simulation.
