

RECOMMANDATION UIT-R S.1512

Procédure de mesure pour déterminer la puissance isotrope rayonnée équivalente et la discrimination de l'antenne d'un satellite non géostationnaire

(Questions UIT-R 231/4 et UIT-R 42/4)

(2001)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que certaines bandes de fréquences sont attribuées pour être utilisées par des réseaux à satellites non géostationnaires (non OSG);
- b) que le nombre de systèmes à satellites non OSG planifiés ou en exploitation a fortement augmenté ces dix dernières années;
- c) que les brouillages subis par ces systèmes deviendront de plus en plus importants pour les autres utilisateurs partageant ces bandes de fréquences à titre primaire;
- d) que les opérateurs de réseaux à satellites non OSG et les administrations pourraient souhaiter mesurer certaines caractéristiques radiofréquences des satellites non OSG;
- e) que les caractéristiques radiofréquences des satellites non OSG sont plus difficiles à mesurer que celles des satellites OSG, étant donné qu'ils se déplacent par rapport à la surface de la Terre,

recommande

1 que la procédure de test de l'Annexe 1 puisse servir de référence à la détermination de la puissance isotrope rayonnée équivalente (p.i.r.e.) et de la discrimination de l'antenne d'un satellite non OSG. Les Annexes 2 et 3 peuvent être considérées comme faisant partie de la procédure de mesure qui permet d'obtenir les niveaux de signal maximal et minimal reçus par la station de test.

ANNEXE 1

Procédure de mesure permettant de déterminer la p.i.r.e. et la discrimination de l'antenne d'un satellite non OSG**1 Introduction**

La procédure qui suit vise à servir de référence aux administrations qui souhaitent réaliser des mesures reproductibles de la p.i.r.e. sur la liaison descendante et du diagramme de gain d'antenne en transmission d'un satellite non OSG en exploitation.

2 Matériel nécessaire

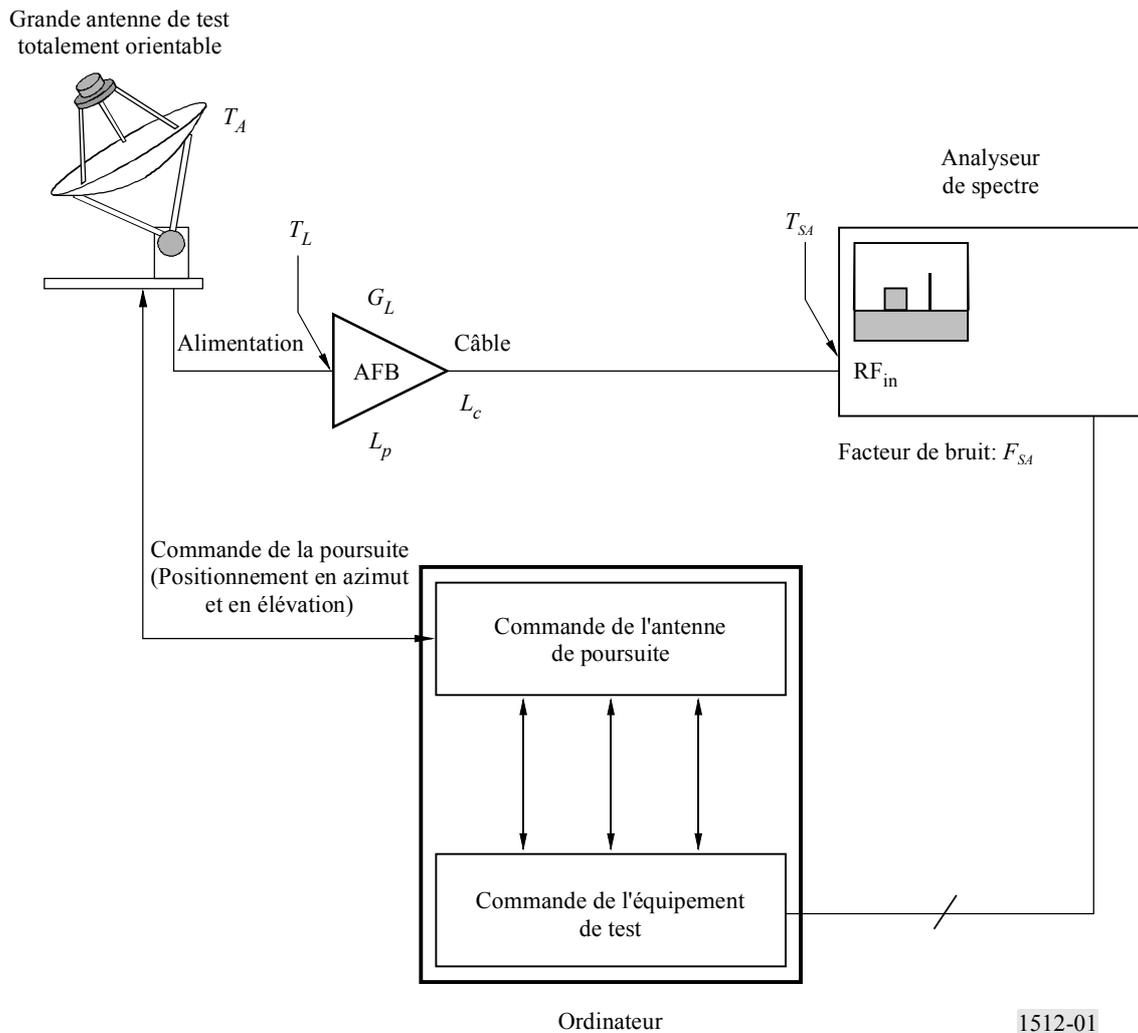
La méthode de test nécessite l'utilisation d'une station terrienne dotée d'une grande antenne totalement orientable pouvant poursuivre un satellite, d'un analyseur de spectre pouvant fournir les mesures requises et d'un ordinateur sur lequel se déroule un programme de test automatisé pouvant effectuer les mesures idoines et enregistrer les données sur un fichier.

3 Description de l'équipement de mesure

Un schéma fonctionnel de l'équipement de mesure est décrit sur la Fig. 1. Chacun de ses paramètres est défini dans le Tableau 1.

FIGURE 1

Schéma fonctionnel de l'installation de mesure



Antenne de test: L'antenne de test devrait pouvoir être orientée sans restriction dans une portion maximale de l'horizon. Les dimensions de son réflecteur devraient être aussi grandes que possible pour accroître le gain de réception et disposer ainsi d'une dynamique de mesure plus grande. La vitesse de dépointage de l'antenne devrait toutefois permettre à celle-ci de rester pointée vers le satellite non OSG à mesure qu'il se déplace dans le ciel. La température de bruit de l'amplificateur à faible bruit (AFB) devrait être aussi basse que possible, afin de minimiser le bruit de fond de l'équipement de test. Il faudrait enfin que le câble reliant l'AFB à l'analyseur de spectre soit de bonne qualité et de longueur minimale, de façon à réduire le plus possible sa contribution au bruit de l'équipement de test.

Analyseur de spectre: Il faut un analyseur de spectre qui puisse être commandé numériquement par un ordinateur et lui retourner les données mesurées. On utilise typiquement dans de telles applications un système de distribution de données pour relier l'ordinateur à l'analyseur de spectre. Le bruit de fond de l'analyseur de spectre devrait être plus petit que celui de l'équipement de

mesure, afin de ne pas limiter la dynamique de mesure. On peut à cet effet procéder à un calcul analytique en déterminant la température de l'équipement de test (Annexe 3) et en la comparant avec celle de l'analyseur. Une méthode alternative au calcul analytique consiste à vérifier que le rapport $(I + N)/N$ est modifié de moins de 1 dB lorsque le signal qui parvient à l'analyseur de spectre est affaibli de 10 dB.

Système informatique: Il doit répondre à deux fonctions. La première est d'orienter l'antenne vers le satellite non OSG et la seconde est de recueillir les données requises. La première fonction nécessite l'étude des données orbitales du satellite non OSG (altitude de l'apogée, altitude du périégée, inclinaison, argument du périégée, heure de passage au noeud ascendant), afin de prévoir la date et le lieu où il sera vu à l'horizon. Il est alors possible de suivre le satellite en prévoyant sa position dans le temps ou en utilisant un système de poursuite en boucle fermé incorporé dans le sous-système de l'antenne. La seconde fonction consiste à effectuer des mesures à des intervalles de temps réguliers et à les enregistrer dans un fichier informatique comprenant aussi d'autres données de position, comme les angles d'azimut et l'élévation de l'antenne de test.

TABLEAU 1

Paramètres obligatoires pour les tests de caractérisation d'un satellite non OSG

Description des paramètres	Symboles	Unités	Valeurs
Paramètres nominaux d'un satellite non OSG			
Puissance transmise à l'antenne	P_S	dBW	
Altitude du satellite	h_s	km	
Largeur de bande occupée par la liaison descendante après modulation	B_{Soc}	MHz	
p.i.r.e. _s - L_s (si constante dans le temps)	p.i.r.e. _s - L_s	dB	
Différence (p.i.r.e. _s - L_s) (variable) ⁽¹⁾	Dif. (p.i.r.e. _s - L_s)	dB	
Fréquence de la liaison descendante	f_D	GHz	
Largeur de bande de référence	B_{ref}	Hz	
Coordonnées de l'antenne de test			
Latitude	f_{test}	dd:mm:ss.s	
Longitude	l_{test}	ddd:mm:ss.s	
Hauteur de l'antenne (amsl)	h_{test}	m	
Caractéristiques de l'antenne de test			
Diamètre	D_{test}	m	
Gain de réception (à la fréquence f_D)	$G_{RX\ test}$	dBi	
Température de bruit	$T_{A\ test}$	K	

TABLEAU 1 (*fin*)

Description des paramètres	Symboles	Unités	Valeurs
Paramètres de test			
Affaiblissement dans la ligne d'alimentation de l'antenne	L_F	dB	
Gain de l'AFB	G_L	dB	
Température de bruit de l'AFB	T_L	K	
Affaiblissement dans le câble	L_c	dB	
Données relatives à l'analyseur de spectre			
Marque et numéro de série			
Réglages de l'analyseur de spectre durant les mesures			
Affaiblissement à l'entrée		dB	
Niveau de référence		dBm	
Résolution en amplitude		dB/Div	
Fréquence centrale	F_C	GHz	
Excursion de fréquence	SPAN	kHz	
Largeur de bande de résolution	ResBW	kHz	
Largeur de bande vidéo	VBW	kHz	
Bruit de fond normalisé ⁽²⁾	No _{SA}	dBm	

- (1) Dans les cas d'un satellite non OSG pour lequel l'antenne utilisée n'est ni à faisceau attaché, ni à rayonnement isotrope, la différence entre les valeurs de (p.i.r.e. – L_s), maximale sur l'axe et minimale sur les bords du faisceau, devrait être donnée.
- (2) Le bruit de fond affiché est celui déterminé après application des facteurs correctifs relatifs à l'oscilloscope, au détecteur d'enveloppe et à la largeur de bande de résolution normalisée.

4 Réalisation de la mesure

Calcul de la puissance maximale: La première étape de la préparation de l'équipement de test consiste à vérifier que la puissance maximale reçue dans la totalité de la bande de fréquences de l'AFB ne dépasse pas celle que peut supporter l'installation. On peut s'assurer que la puissance maximale supportée par l'analyseur de spectre ne sera pas dépassée en adaptant la valeur des gains ou en introduisant des affaiblissements le long du circuit de réception. L'expression qui suit peut être utilisée pour le calcul du niveau de signal reçu sur la porteuse de test, tel qu'il est mesuré à l'entrée de l'analyseur de spectre:

$$P_{RX\ test} = P_s + G_s - (L_s + L_{abs}) + G_{RX\ test} + G_{test-set} \quad (1)$$

où:

- $P_{RX\ test}$: puissance du signal reçu par l'analyseur de spectre (dBW)
 P_s : puissance à la flasque de l'antenne du satellite (dBW)
 G_s : gain de l'antenne du satellite dans la direction de la station de test (dBi)
 L_s : affaiblissement en espace libre, obtenu par l'équation suivante:

$$L_s = 10 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad \text{dB}$$

où:

d : distance entre l'antenne de test et le satellite (m)

λ : longueur d'onde du signal (m)

L_{abs} : absorption atmosphérique (dB)

$G_{RX\ test}$: gain de l'antenne de test diminué de l'affaiblissement de l'alimentation (valeur au niveau de la flasque de sortie) (dBi)

$G_{test-set}$: gain de l'équipement de test, calculé de la manière suivante:

$$G_{test-set} = G_L - L_c \quad (2)$$

où:

G_L : gain de l'AFB (dB)

L_c : affaiblissement dans le câble (dB).

Un exemple de calcul de la puissance maximale reçue est donné dans l'Annexe 2.

Calcul de la puissance minimale: Il est nécessaire de déterminer le bruit de fond causé par l'analyseur de spectre et l'équipement de test afin de préciser la dynamique de la mesure. La méthode permettant de déterminer en pratique la puissance minimale du signal, mesurable par l'équipement de test est expliquée dans l'Annexe 3.

Étalonnage de la p.i.r.e.: L'étape suivante consiste à étalonner l'équipement de test. La façon la plus précise de déterminer la p.i.r.e. d'un satellite non OSG est de mesurer le niveau de l'énergie rayonnée par une source dont la p.i.r.e. est connue. Cette mesure sert alors de puissance surfacique de référence permettant de déterminer la p.i.r.e. d'un satellite non OSG. Diverses sources radiofréquences stables peuvent servir de référence d'étalonnage, parmi lesquelles les balises de satellite OSG dont on connaît la p.i.r.e. émise, ou certaines radiosources stellaires. En l'absence d'un tel étalonnage, les mesures effectuées donneront des informations quant au gain relatif du satellite non OSG dans différentes directions, mais ne permettront pas de déterminer avec exactitude la puissance rayonnée dans une direction donnée.

Mesurer la variation du gain de réception de l'équipement de test dans toute la bande de fréquences utilisée lors des tests fait partie intégrante du processus d'étalonnage. Il n'est pas rare en effet que cette variation soit de l'ordre de 2 à 3 dB, aussi est-il important de connaître l'ampleur de la variation du gain entre la fréquence utilisée pour mesurer le niveau de p.i.r.e. de référence et celle à laquelle les mesures seront effectuées.

Mesure du signal issu d'un satellite non OSG: A chacun de ses passages, un satellite non OSG donné est suivi par l'antenne de poursuite et l'énergie qu'il émet est mesurée. Les angles d'azimut et d'élévation de l'antenne doivent aussi être enregistrés pour chaque point de mesure, en vue d'un traitement ultérieur. Une réinitialisation automatique de l'analyseur de spectre s'effectuera avant toute nouvelle mesure. Il faudrait effectuer une moyenne de trois balayages dans l'excursion de fréquence afin de minimiser les effets d'éventuelles variations rapides du niveau de la puissance rayonnée.

L'échantillonnage temporel des données doit être suffisamment fin pour permettre de déterminer la forme des lobes secondaires de l'antenne embarquée. Il faut tenir compte de deux variables pour établir ce pas temporel: la complexité du diagramme de faisceau émis par le satellite non OSG et son altitude. L'équipement de test a besoin entre deux mesures d'un temps minimal qui dépend de plusieurs facteurs: le temps nécessaire à l'analyseur de spectre pour effectuer les trois balayages,

faire les mesures, transmettre les données au système informatique, auquel s'ajoute le temps pris pour mémoriser ces données. Le temps de balayage minimal de l'analyseur de spectre dépend de l'étendue et de la résolution de la bande spectrale. On peut le trouver dans le manuel de spécifications du fabricant.

Il faudra tenir compte de risque de brouillage encouru par un satellite non OSG lors de son passage à proximité de l'arc OSG. De fait, cela risque de limiter la quantité de données qui peuvent être collectées lorsque l'antenne de test scrute une région étroite entourant l'arc OSG. Une étude de cet arc avant le démarrage des tests pourrait s'avérer utile pour trouver autour d'une portion significative de l'arc OSG une zone étroite et dépourvue de satellites dans laquelle on puisse utiliser la porteuse de test à ondes entretenues.

Les tests devraient être effectués dans des conditions de ciel dégagé afin de réduire le plus possible les variations de signal mesurées au cours d'un même test. Le site de test devrait de préférence être choisi sur un emplacement présentant dans toutes les directions un horizon aussi proche que possible du degré zéro d'élévation, afin d'offrir le champ de vision le plus large possible.

Si la trajectoire au sol du satellite non OSG est répétitive, on ne pourra avoir accès qu'à un échantillon limité de coupes du diagramme d'antenne. Il peut alors se révéler nécessaire de procéder en d'autres lieux à des tests complémentaires, afin d'obtenir un éventail de données suffisamment large pour bien décrire le diagramme de la p.i.r.e. rayonnée par le satellite non OSG.

5 Traitement des données recueillies

Satellite non OSG dont le diagramme de p.i.r.e. est invariant au cours du temps: Chaque passage du satellite non OSG constitue un plan de coupe de son diagramme de p.i.r.e., pourvu que celui-ci ne varie pas en fonction du point subsatellite considéré. Un nombre suffisant de coupes permet de tracer le diagramme de la p.i.r.e. du satellite en fonction des angles de tangage et de roulis mesurés par rapport au nadir.

Dans cette optique, les paramètres d'orbite du satellite non OSG ainsi que les angles d'azimut et d'élévation de l'antenne de test pour chaque point de mesure seront nécessaires pour déterminer:

- d : distance du satellite non OSG à la station de test
- θ_1 : angle de tangage de la station de test par rapport au nadir du satellite
- θ_2 : angle de roulis de la station de test par rapport au nadir du satellite.

On peut déterminer la p.i.r.e. du satellite non OSG ($p.i.r.e._s$) suivant la direction (θ_1, θ_2) à l'aide de l'équation:

$$p.i.r.e._s = p.i.r.e._{ref} + 20 \log \left[\frac{d_{ref}}{d_{mes}} \right] + \Delta_{niveau} + cal \quad (3)$$

où:

- $p.i.r.e._{ref}$: p.i.r.e. de la source de référence (dBW)
- d_{ref} : distance de la station terrienne à la source de référence (m)
- d_{mes} : distance de la station terrienne au satellite étudié (m)
- Δ_{niveau} : différence de niveau de puissance mesurée entre la source de référence et le satellite non OSG (dB)
- cal : variation de gain entre la fréquence de référence et la fréquence mesurée (dB).

Une fois converties toutes les données de mesure dans les valeurs p.i.r.e._s, θ_1 et θ_2 correspondantes, on peut tracer le diagramme de la p.i.r.e._s en fonction des angles θ_1 et θ_2 . On pourra utiliser un logiciel dessinant les courbes de niveau pour des données en trois dimensions, ce qui facilitera la lecture du graphe. La comparaison des diagrammes des différents satellites de la constellation permettra de déterminer si un satellite donné se trouve hors de l'enveloppe de spécification qui lui a été attribuée.

Satellite non OSG dont le diagramme de p.i.r.e. varie dans le temps: Dans ce cas, il est alors impossible de mesurer un diagramme de p.i.r.e. Les faisceaux attachés constituent une illustration de ce cas: la direction de visée du faisceau du satellite non OSG pointe constamment vers le même lieu géographique tant que celui-ci est en vue. Une station de test observant un satellite non OSG muni d'un tel faisceau verrait alors toujours le même point du faisceau du satellite non OSG, comme elle le ferait dans le cas d'un satellite OSG.

Lorsque les diagrammes de p.i.r.e. des satellites non OSG varient dans le temps, on peut tout au plus déduire la puissance surfacique équivalente (epfd) rayonnée par un satellite sur le site de test, ou celle rayonnée par la constellation tout entière si la trajectoire au sol est répétitive (voir la Note 1). Pour ce faire, il faut d'abord calculer, pour chaque point de mesure, la puissance surfacique équivalente rayonnée sur le site de test, en utilisant l'équation suivante:

$$\Phi = p.i.r.e.ref - L_{abs-ref} - L_{s-ref} + G_{1m^2} + \Delta_{niveau} + cal \quad (4)$$

où:

- Φ : puissance surfacique rayonnée par le satellite non OSG, mesurée sur le site de test dans la largeur de bande de référence, B_{ref} , de l'analyseur de spectre (dB(W/(m² · B_{ref})))
- $p.i.r.e.ref$: p.i.r.e. de la source de référence (dBW)
- $L_{abs-ref}$: affaiblissement dû à l'atmosphère dans la direction de la source de référence (dB)
- L_{s-ref} : affaiblissement en espace libre dans la direction de la source de référence (dB)
- G_{1m^2} : gain d'une antenne de 1 m² de surface (dBi)
- cal : variation de gain entre la fréquence de référence et la fréquence mesurée (dB).

Une fois connus la puissance surfacique, ainsi que les angles d'azimut et d'élévation relatifs à l'emplacement de l'antenne de test, on peut ajouter aux points de mesure le masque hors axe d'une antenne pointant vers un satellite OSG, et obtenir ainsi l'epfd par un satellite non OSG donné. Il est alors possible, en rassemblant tous les points de mesure, d'établir pour chaque satellite non OSG une statistique de son epfd rayonnée. La comparaison des statistiques de différents satellites de la constellation permet de détecter tout satellite opérant en dehors de l'enveloppe de performance qui lui a été spécifiée.

De plus, si la trajectoire au sol de la constellation est répétitive, il est possible de déterminer les statistiques d'epfd de la constellation par l'utilisation des mesures issues d'autres satellites qui la composent. Il faut pour cela opérer un décalage temporel lié aux paramètres de l'orbite non OSG et procéder à une addition de puissance.

NOTE 1 – Cela suppose que la contribution des autres satellites est négligeable dans le cas de constellations à trajectoire au sol répétitive. Cette hypothèse n'est pas forcément vérifiée pour toutes les tailles d'antenne de satellites OSG du SFS ou pour toutes les constellations à trajectoire au sol répétitive.

6 Facteurs affectant la précision de mesure

La précision de toutes les mesures effectuées sur la liaison descendante par l'analyseur de spectre dépendra évidemment de la précision de mesure de cet instrument. Cependant, il peut y avoir quelques variations minimales du niveau de signal mesuré qui ne sont pas introduites par l'équipement de mesure, et que l'on peut le plus souvent négliger. Aussi, l'interprétation des données mesurées selon la présente procédure se fait sous réserve du respect des hypothèses suivantes:

- Les différences de température de bruit d'antenne suivant l'angle d'élévation considéré n'ont que peu de répercussions sur la mesure du rapport $(I + N)/N$. On accroît la précision si l'on tient compte de la variation estimée de la température de bruit de l'antenne en fonction de l'angle d'élévation.
- La commande de puissance de la liaison montante est utilisée pour toutes les liaisons montantes au satellite non OSG et compense parfaitement, dB pour dB, l'affaiblissement dû à la pluie sur la liaison montante. Ces effets peuvent toutefois être négligés dans le cas de réseaux à satellites non OSG utilisant un traitement à bord.
- Les puissances émises par les stations terriennes non OSG et le satellite non OSG varient de façon négligeable. Encore une fois, les variations de la puissance émise reçue par la station terrienne non OSG peuvent être négligées lorsqu'un traitement à bord est utilisé.
- Les imprécisions de poursuite de l'antenne de la station terrienne relatives au réseau à satellites non OSG et à l'antenne de test sont en général faibles et n'affectent pas de manière significative les niveaux de brouillage mesurés.
- L'absorption atmosphérique varie peu dans la plage des angles d'élévation considérée, mais augmente effectivement si la fréquence augmente et si l'angle d'élévation diminue. Cette généralisation vaut pour une fréquence inférieure à 15 GHz ou un angle d'élévation supérieur à 10°. Pour une fréquence supérieure à 15 GHz ou un angle d'élévation inférieur à 10°, il faut toutefois tenir compte de l'absorption atmosphérique, sous peine de ne pas obtenir la précision souhaitée.
- Les sens de polarisation de l'antenne du satellite brouilleur et de l'antenne de poursuite de la station terrienne influenceront sur le niveau de densité de puissance de bruit du satellite non OSG reçu par la station terrienne. Dans le cas d'un satellite non OSG utilisant une polarisation circulaire et d'une station terrienne OSG recevant des ondes à polarisation rectiligne verticale et/ou horizontale, l'amplitude du signal reçu variera de 1 à 3 dB en fonction de l'alignement des antennes et de l'angle hors axe d'antenne de la station terrienne par rapport au centre du faisceau principal du satellite. Dans la pratique, le facteur de couplage sera vraisemblablement fortement inférieur à 3 dB, exception faite du cas où le faisceau principal du satellite non OSG pointe directement sur l'antenne de poursuite de la station terrienne. Toutefois, le gain du faisceau principal de l'antenne du satellite non OSG est connu de façon beaucoup plus précise que celui des lobes secondaires, et pourra donc être utilisé dans tout traitement ultérieur des données collectées.

ANNEXE 2

Exemple de calcul de la puissance maximale reçue à l'entrée de l'AFB de l'équipement de test

Une station terrienne, illuminée par un signal source placé à une distance d , reçoit la puissance suivante:

$$P_R = \frac{P_T \cdot g_T}{4\pi d^2} \cdot g_R \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad \text{W}/B_{ref} \text{ (Hz)} \quad (5)$$

où:

- P_R : puissance reçue à l'entrée de l'analyseur de spectre (W)
- P_T : puissance à la flasque de l'antenne du satellite non OSG (W)
- g_T : puissance crête émise par l'antenne du satellite non OSG vers le site de test
- d : distance entre le site de test et le satellite non OSG (m)
- g_R : gain de la station terrienne de réception.

Sachant que:

$$\Phi = 10 \log \left(\frac{P_T \cdot g_T}{4\pi d^2} \right) \equiv \text{puissance surfacique} \quad \text{dB(W/(m}^2 \cdot B_{ref} \text{ (Hz))})$$

$$G_R = 10 \log(g_R) \equiv \text{Gain de l'antenne de test} \quad \text{dBi}$$

$$G_{1\text{m}^2} = 10 \log \left(\frac{4\pi}{\lambda^2} \right) \equiv \text{Gain d'une antenne d'1 m}^2 \text{ de surface} \quad \text{dBi}$$

On peut réécrire l'équation (5) comme suit:

$$P_R = \Phi + G_R - G_{1\text{m}^2} \quad \text{dB(W}/B_{ref} \text{ (Hz))} \quad (6)$$

En reformulant l'équation (6) comme une fonction du diamètre D de l'antenne de test (m), et du rendement η (%), on peut exprimer la puissance reçue à la sortie de l'antenne de test de la façon suivante:

$$P_R = \Phi + 20 \log(D(m)) + 10 \log(\eta/100) - 1.05 \quad \text{dB(W}/B_{ref} \text{ (Hz))} \quad (7)$$

Soit une antenne de test de 8 m de diamètre, ayant un rendement de 65%, une largeur de bande de référence de 40 kHz, la puissance surfacique maximale devrait être de $-131 \text{ dB(W/m}^2)$. Supposons encore que l'équipement de test présente un gain de 42 dB et un affaiblissement total dans la ligne d'alimentation de 1 dB. Alors, la puissance maximale reçue à l'entrée de l'analyseur de spectre dans une largeur de bande de référence de 40 kHz est:

$$P_R = -131 + 20 \log(8) + 10 \log(65/100) - 1,05 - 1 + 42 = -74,9 \text{ dB(W}/40 \text{ kHz)}$$

Si la largeur de bande totale occupée par la liaison descendante était de 2,0 GHz, et si l'on supposait une puissance surfacique uniforme dans toute la largeur de bande occupée, la puissance totale maximale parvenant à l'analyseur de spectre serait alors:

$$P_{R\ Total} = -74,9 \text{ dB(W/40 kHz)} + 10 \log(2 \times 10^9 / 40 \times 10^3) = -27,9 \text{ dBW} = 2,1 \text{ dBm}$$

Ce chiffre ne dépasse pas en général la puissance maximale totale tolérée par la plupart des analyseurs de spectre. Dans le cas où la puissance maximale totale calculée serait supérieure au niveau de sécurité que supporte l'entrée de l'analyseur de spectre, il pourrait s'avérer nécessaire d'insérer avant celui-ci quelques affaiblissements. Notons que les niveaux de signaux mesurés sont relativement élevés lorsque l'antenne de test scrute la zone des satellites OSG. La différence entre l'affaiblissement le long du trajet pour le cas d'un satellite non OSG et pour celui d'un satellite OSG étant en général supérieure au surplus de p.i.r.e. rayonnée par le satellite OSG par rapport à celle émise par le satellite non OSG, on peut penser que la puissance instantanée reçue par l'analyseur de spectre calculée dans le cas d'un alignement le plus défavorable représente typiquement la configuration la plus défavorable. Il serait toutefois prudent d'effectuer les calculs dans les deux cas afin de s'assurer que l'équipement de test sera protégé.

ANNEXE 3

Niveau de mesure le plus faible

Il est nécessaire de connaître le niveau de mesure le plus faible pour fixer la gamme dynamique dans laquelle des mesures exactes pourront être effectuées. C'est le bruit de fond thermique de l'équipement de test qui détermine ce niveau. Dans ce qui suit, les termes en majuscules sont exprimés en dB, et les minuscules désignent des nombres sans dimension.

Pour établir la performance du système, on a utilisé en premier lieu l'équation suivante, qui modélise la liaison radioélectrique:

$$P_{RX\ test} = P_s + G_s - L_s - L_{abs} + G_{RX\ test} + G_{test-set} \quad (8)$$

où:

$P_{RX\ test}$: puissance du signal reçu (dBW)

P_s : puissance à la flasque de l'antenne du satellite (dBW)

G_s : gain de l'antenne du satellite dans la direction de la station de test (dBi)

L_s : affaiblissement en espace libre obtenu par l'équation:

$$L_s = 10 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad \text{dB} \quad (9)$$

où:

d : distance entre l'antenne de test et le satellite (m)

λ : longueur d'onde du signal radioélectrique (m)

L_{abs} : absorption atmosphérique (dB)

$G_{RX\ test}$: gain de l'antenne de test diminué de l'affaiblissement de l'alimentation (valeur au niveau de la flasque de sortie) (dBi)

$G_{test-set}$: gain de l'équipement de test, calculé de la manière suivante:

$$G_{test-set} = G_L - L_c \quad \text{dB}$$

où:

G_L : gain de l'AFB (dB)

L_c : affaiblissement dans le câble (dB).

Un analyseur de spectre affiche un niveau de puissance qui comprend à la fois la puissance utile et la puissance de bruit présente dans la largeur de bande considérée. Le terme $(I + N)/N$, qui montre l'influence du bruit sur le niveau de brouillage causé par un satellite non OSG, traduit au mieux le rapport entre le niveau de brouillage mesuré, d'origine non OSG, et le niveau de bruit de fond mesuré. Dans la plupart des cas, $I \gg N$, ce qui implique $I/N \cong (I + N)/N$. Cette approximation n'est plus valable lorsque $(I + N)/N < 5$ dB. Ce rapport peut être exprimé de la manière suivante:

$$\left(\frac{I + N}{N} \right) = 10 \log \left(\frac{P_{RX\ test} + n_{test-set}}{n_{test-set}} \right) \quad (10)$$

où:

$(I + N)/N$: somme de la puissance de brouillage d'origine non OSG et du bruit, divisée par la puissance de bruit mesurée sur l'analyseur de spectre (dB)

$P_{RX\ test}$: puissance du signal à l'entrée de l'analyseur de spectre (W)

$n_{test-set}$: puissance de bruit ramenée à l'entrée de l'analyseur de spectre (W).

On peut réécrire l'équation précédente de la manière suivante:

$$P_{RX\ test} = 10 \log \left\{ n_{test-set} \left(10^{\frac{\left(\frac{I+N}{N} \right)}{10}} - 1 \right) \right\} \quad (11)$$

Ainsi la puissance surfacique (dB(W/m²)) + l'ouverture d'antenne aperture (dB(m²)) + $G_{test-set} = P_{RX\ test}$ et l'ouverture d'antenne = $\pi (D_{test}^2/4)$ (rendement).

Par conséquent:

$$\Phi = P_{RX\ test} + 1,049 - 10 \log(\eta/100) - 20 \log D_{test} - G_{test-set} \quad (12)$$

où:

Φ : puissance surfacique (dB(W/m²) en ResBW (Hz))

η : rendement de l'antenne de test (%)

D_{test} : diamètre de l'antenne de test (m).

La largeur de bande de résolution (ResBW) de l'analyseur de spectre constitue la largeur de bande de référence sur laquelle s'applique la puissance surfacique.

L'expression suivante donne le bruit total de l'équipement de test:

$$n_{test-set} = n_{set-up} + n_{sa}$$

En choisissant un analyseur de spectre dont la contribution au bruit (N_{sa}) est bien inférieure à celle de l'équipement de test (N_{set-up}) alors:

$$N_{test-set} \cong N_{set-up}$$

n_{set-up} est donné par:

$$t_{set-up} = \left(\frac{t_A}{l_f} + \left(\frac{l_f - 1}{l_f} \right) t_0 + t_L \right) \left(\frac{g_L}{l_c} \right) + \left(\frac{l_c - 1}{l_c} \right) t_0 \quad (13)$$

où:

t_A : température de bruit de l'antenne (K)

l_f : affaiblissement dans l'alimentation de l'antenne

t_0 : température ambiante (K)

t_L : température de l'AFB (K)

l_c : affaiblissement dans le câble

g_L : gain de l'AFB.

En utilisant l'équation (13) et les autres paramètres de l'équipement de test, on obtient une nouvelle formulation (12) de la puissance surfacique, dont les résultats sont de précision décroissante.

Une porteuse non modulée à ondes entretenues constituerait le signal de test le plus approprié pour augmenter le rapport $(I + N)/N$ lors de la mesure, sur la liaison descendante, du niveau de signal brouilleur provenant du satellite non OSG. On peut améliorer le rapport $(I + N)/N$ en diminuant la largeur de bande de résolution de l'analyseur de spectre, la puissance à mesurer se trouvant presque tout entière dans une bande de fréquences très étroite. Toutefois, lorsque le signal mesuré est à modulation numérique, le rapport $(I + N)/N$ dépend uniquement du rapport entre la puissance reçue dans la largeur de bande de résolution (ResBW) et le bruit total dans cette bande. Dans ce cas, diminuer la ResBW ne permet plus d'augmenter le rapport $(I + N)/N$. La Fig. 2 présente les mesures des rapports $(I + N)/N$ dans les cas d'une porteuse non modulée et d'une porteuse à modulation numérique. Etant donné que la puissance totale est plus forte lorsque les largeurs de bande des porteuses brouilleuses augmentent (10 et 30 MHz), il n'est pas nécessaire, pour obtenir les améliorations voulues du signal $(I + N)/N$, d'émettre un signal de test à ondes entretenues avec la même puissance totale que celle requise par la porteuse modulée.

TABLEAU 2

Exemple de calcul de la température de bruit*Données relatives à l'équipement de test*

T_{ANT} :	25 K
L_F :	1 dB
T_{LNA} :	100 K
G_{LNA} :	45 dB
L_C :	3 dB
$G_{test-set}$:	42 dB

Données relatives à l'antenne de test

Diamètre d'antenne:	8 m
Rendement d'ouverture:	65%
Puissance surfacique incidente:	-160,0 dB(W/(m ² · 40 kHz))

Entrée de l'AFB

B_{ref} :	40 kHz
I_{test} :	-145,86 dB(W/ B_{ref})
T_{SYS} :	179,5 K
$I/N_{thermique}$:	14,18 dB

Entrée du récepteur

C_{RXIP} :	-103,9 dB(W/ B_{ref})
T_{SA} (entrée fermée):	341 193 K
T_{SYS}' :	2 845 000 K
T_{SA}' (équipement de test à I/P):	3 186 000 K
Bruit de fond résultant	-125,3 dBm/ResBW
Accroissement du bruit de fond:	9,70 dB
$I/N_{thermique}$:	13,69 dB
Diminution de I/N :	0,49 dB

Données relatives à l'analyseur de spectre

Bruit de fond affiché:	-135,0 dBm/ResBW
Bruit de fond réel:	-133,29 dBm/ResBW
ResBW:	10 Hz
Facteur de bruit:	30,71 dB
