

RECOMMANDATION UIT-R RA.1237-1*

Protection du service de radioastronomie contre les rayonnements non désirés produits par des systèmes à modulation numérique à large bande

(Question UIT-R 145/7)

(1997-2003)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que le service de radioastronomie et d'autres services passifs continuent d'apporter à la science des contributions importantes et concrètes;
- b) que la recherche en radioastronomie dépend essentiellement des observations qui peuvent être faites aux limites extrêmes de sensibilité;
- c) que tous les services tireront parti de mesures permettant de réduire ou d'éliminer la présence de rayonnements non désirés dans le spectre;
- d) que les émetteurs, en particulier ceux des stations spatiales, utilisent de plus de plus des techniques de modulation avec étalement du spectre en séquence directe (DSSS) et de modulation numérique à large bande qui peuvent produire des bandes latérales de rayonnements non désirés s'étendant à des fréquences très éloignées de la porteuse tel que cela est expliqué à l'Annexe 1;
- e) que des moyens techniques pour filtrer ces bandes latérales ont été mis au point et utilisés avec succès;
- f) que l'on connaît des techniques de modulation numérique produisant des niveaux de rayonnements non désirés intrinsèquement faibles et que leur efficacité en terme d'utilisation du spectre a été démontrée;
- g) qu'il n'existe pas, du point de vue du service brouillé exploité dans une bande extérieure à la bande attribuée au service produisant les rayonnements non désirés, de distinction objective entre les brouillages du domaine des rayonnements non essentiels et les brouillages du domaine des émissions hors bande,

recommande

- 1 pour les systèmes employant des techniques de modulation numérique à large bande, de prendre toutes les mesures nécessaires pour réduire le niveau des bandes latérales débordant de la bande attribuée au service;
- 2 en établissant des limites pour les rayonnements non désirés se produisant dans des bandes attribuées à titre primaire au service de radioastronomie, de prendre note des seuils de brouillage indiqués dans la Recommandation UIT-R RA.769.

* NOTE – Les niveaux de brouillages préjudiciables causés au SRA, dont il est question dans l'Annexe 1 de la Recommandation UIT-R RA.769, ne sont pas acceptés par les Administrations arabes car considérés irréalistes, comme confirmé par les Conférences mondiales des radiocommunications précédentes de 1995, 1997 et 2000 traitant de la Recommandation 66.

Annexe 1

Brouillage du service de radioastronomie par des rayonnements non désirés (rayonnements non essentiels et émissions hors bande)

1 Introduction

L'expérience acquise pendant plus de vingt ans montre que la plupart des brouillages qui perturbent gravement le service de radioastronomie proviennent d'émetteurs montés à bord de satellites. La majorité de ces brouillages sont dus à des rayonnements non désirés (produits d'intermodulation et bandes latérales engendrées par des transmissions numériques, s'étendant parfois sur plusieurs fois la largeur de bande attribuée en dehors de la bande assignée à l'émetteur d'un satellite). Un site d'observation bien protégé contre les émetteurs de Terre n'est pas protégé contre les rayonnements provenant des satellites et les satellites ne sont pas accessibles pour une implantation de filtres ou d'autres techniques de filtrage. En conséquence, les rayonnements non désirés provenant des satellites constituent la menace la plus sérieuse pour le service de radioastronomie, compte tenu notamment de la rapidité à laquelle l'utilisation des satellites se développe actuellement.

2 Rayonnements non essentiels et émissions hors bande provenant de la modulation numérique

L'utilisation de techniques de modulation numérique, y compris de modulation avec DSSS, peuvent engendrer des bandes latérales éloignées de la porteuse. La classification de ces bandes latérales, en rayonnements non essentiels ou en émissions hors bande, est définie dans les numéros 1.144 à 1.146 du Règlement des radiocommunications (RR). Dues au processus de modulation, comme c'est le cas des bandes latérales des modulations par étalement du spectre, les émissions hors bande sont définies comme étant au voisinage *immédiat* de la largeur de bande nécessaire; cette définition est communément interprétée comme signifiant que la gamme de fréquences des émissions hors bande est quelquefois plus large que la largeur de bande nécessaire. Les rayonnements non essentiels se produisent à l'extérieur de la largeur de bande nécessaire et leur niveau peut être réduit sans que soit altérée la transmission des informations correspondantes, deux caractéristiques s'appliquant également aux bandes latérales des modulations par étalement du spectre. Or, des bandes latérales de ce type peuvent sérieusement brouiller une bande adjacente ou une bande plus distinctement séparée en fréquences, comme le montrera le § 5.1. La notion de domaines pour les rayonnements non désirés a été élaborée essentiellement pour préciser les définitions (voir les Recommandations UIT-R SM.341 et UIT-R SM.1541).

3 Niveaux de brouillage pour la radioastronomie

L'étude des niveaux auxquels des signaux brouilleurs deviennent préjudiciables pour la radioastronomie est exposée dans la Recommandation UIT-R RA.769 en termes de puissance surfacique et de densité spectrale de puissance surfacique au niveau de l'antenne de radioastronomie et sont calculées pour une série représentative de bandes de radioastronomie sur la totalité du spectre. Les niveaux de brouillage ainsi déterminés sont applicables, dans une large mesure, à un grand nombre de services actifs susceptibles de brouiller le service de radioastronomie. Les résultats présentés dans la Recommandation UIT-R RA.769 sont récapitulés dans le Tableau 1.

L'Appendice 3 du RR fixe des limites aux rayonnements non essentiels en fonction de la puissance émise dans la ligne d'émission d'une antenne. Or, pour traduire ces valeurs limites en niveaux de brouillage pour la radioastronomie, il faudrait connaître le détail des caractéristiques de l'antenne

émettrice pour chaque source potentielle de brouillage ainsi que l'affaiblissement le long du trajet entre cette antenne émettrice et une antenne de radioastronomie quelconque. Par ailleurs, de telles limites ne conviennent pas dans le cas de réseaux d'antennes actives, puisque dans ce cas la sortie d'émetteur n'est pas unique. Ces considérations nous amènent à conclure qu'il vaut mieux établir ces limites de rayonnement par rapport à la puissance isotrope rayonnée équivalente (p.i.r.e.) dans la direction d'un observatoire de radioastronomie.

Prenons comme exemple de l'utilisation de la p.i.r.e. le cas d'un émetteur à bord d'un satellite géostationnaire: il est probable que n'importe quel satellite de ce type, étant donné qu'il est visible au-dessus de l'horizon depuis une grande partie de la Terre, émettra des lobes latéraux dans la direction d'un ou de plusieurs observatoires de radioastronomie, mais il est possible que sa liaison descendante n'illumine qu'une zone relativement peu étendue dans laquelle peut ne se trouver aucun observatoire. En conséquence, le concepteur d'un système à satellites peut choisir de réduire les niveaux de rayonnement dans les lobes latéraux pour éviter de brouiller le service de radioastronomie. Cette solution serait possible si les limites sont établies en fonction de la p.i.r.e. rayonnée dans la direction d'un observatoire, alors que si elles le sont en fonction de la puissance émise dans la ligne d'émission d'une antenne, comme c'est actuellement le cas dans l'Appendice 3 du RR, il faudrait alors supposer, dans le cas le plus défavorable, que le gain total de l'antenne émettrice pourrait rayonner en direction d'un observatoire. Ces dernières limites pourraient être beaucoup plus difficiles à observer. Il apparaît donc que les valeurs de p.i.r.e. dans la direction d'une antenne de radioastronomie conviennent beaucoup mieux à l'établissement de limites de rayonnements non désirés destinées à assurer la protection du service de radioastronomie. Cette conclusion s'applique aussi à n'importe quel autre type d'émission et notamment à celles provenant d'émetteurs au sol. Il est possible de calculer les valeurs de p.i.r.e. à partir des valeurs de puissance surfacique et de densité spectrale de puissance surfacique indiquées dans la Recommandation UIT-R RA.769 dès lors qu'on connaît les valeurs d'affaiblissement de propagation.

Il convient de noter en outre que pour calculer le niveau de brouillage, il faut connaître les niveaux de rayonnements non désirés en valeurs absolues, et non relatives (c'est-à-dire exprimées en décibels) par rapport aux émissions principales. En effet, dans de nombreux cas, les rayonnements non désirés sont fort éloignés en fréquence des émissions principales, lesquelles occupent des bandes attribuées différentes de celles du service affecté. Il est donc logique d'établir les limites en unités absolues de puissance (puissance surfacique ou densité spectrale de puissance surfacique) et non comme fraction de l'émission principale.

4 Brouillages causés par des satellites

Dans le cas des satellites, il est possible généralement de supposer que la transmission se fait en visibilité directe de sorte que, pour déterminer l'affaiblissement le long de ce trajet, il suffit de connaître la distance à laquelle se situe le satellite. Le Tableau 1 présente des valeurs de puissance surfacique et de densité spectrale de puissance surfacique au niveau des radiotélescopes au sol et correspondant aux niveaux de seuils de brouillage fixés dans la Recommandation UIT-R RA.769 pour les diverses bandes attribuées à la radioastronomie. Alors que la Recommandation UIT-R RA.769 indique des valeurs pour des observations tant du continuum que des raies spectrales, la valeur indiquée dans le Tableau 1 est, soit la valeur inférieure de la limite, soit la valeur la mieux adaptée à l'utilisation de la bande; ces valeurs sont fondées sur une réception au point à 0 dBi du lobe de l'antenne de radioastronomie. On observera que, dans le cas particulier des satellites géostationnaires, les limites de brouillage vis-à-vis du service de radioastronomie sont de 15 dB inférieures aux valeurs indiquées au Tableau 1, afin de permettre des observations jusqu'à moins de 5° des satellites en orbite géostationnaire, comme il est expliqué à l'Annexe 1 à la Recommandation UIT-R RA.769.

Dans le cas d'un émetteur embarqué à bord d'un satellite, on suppose que la distance de passage au plus près d'un observatoire est égale à l'altitude du satellite, h (m) au-dessus de la surface de la Terre. La limite de p.i.r.e. (dBW) est égale à la puissance surfacique indiquée à la colonne 2 du Tableau 1, plus le facteur d'affaiblissement géométrique suivant:

$$20 \log h + 10 \log 4\pi \quad \text{dB} \quad (1)$$

Les valeurs du facteur d'affaiblissement géométrique sont présentées au Tableau 2 pour différentes valeurs de h .

5 Rayonnements non désirés émis par des satellites posant un problème particulier au service de radioastronomie

5.1 Modulation avec étalement du spectre en séquence directe

Dans un système sans mise en forme des impulsions, ce type de modulation se traduit par un spectre de puissance dont la forme est celle d'une fonction en sinus carré de la fréquence avec des bandes latérales très étendues. Si f est la fréquence mesurée à partir de la porteuse et T la période de base de la fonction d'étalement, la forme du spectre est:

$$(\sin(\pi f T) / (\pi f T))^2 \quad (2)$$

Les niveaux de puissance de crête dans les bandes latérales décroissent en fonction de f^{-2} , c'est-à-dire uniquement de 6 dB par octave dans f . Dans le cas le plus défavorable, le spectre qui est rayonné suit l'équation (2) sur une large gamme de fréquences et peut sérieusement brouiller le service de radioastronomie à des fréquences très éloignées de la porteuse. Toutefois, dans des systèmes employant des techniques de ce type, il s'est généralement avéré que seule la partie centrale du spectre émis est acceptée par les filtres FI du récepteur, de sorte que les bandes latérales additionnelles constituent des rayonnements non désirés.

Les satellites de radionavigation GLONASS, qui sont exploités dans la bande 1 597-1 617 MHz, et dont le rayonnement correspond étroitement au rayonnement représenté par l'équation (2), sont un exemple de source de brouillage très élevé dû à des bandes latérales d'une modulation par étalement de spectre; ils causent d'importants brouillages à la radioastronomie dans la bande 1 610,6-1 613,8 MHz alors que leur fréquence d'émission utile se situe nettement à l'extérieur de cette bande, et jusque et y compris dans la bande 1 660-1 670 MHz. Dans le cas des signaux GLONASS, le spectre présente aussi des «pointes» de fréquence (c'est-à-dire des composantes en bande étroite) dans les minima compris entre les lobes de diagramme sinus; ces pointes sont engendrées par le fonctionnement non idéal du modulateur et peuvent être particulièrement gênantes pour les mesures de radioastronomie des raies spectrales étroites. Le système mondial de radiorepérage GPS, qui est un peu similaire, utilise des satellites dont les émissions DSSS sont centrées sur 1 575,42 MHz. Les satellites GPS de la deuxième génération causent énormément moins de brouillage au service de radioastronomie, malgré l'utilisation de fonctions d'étalement employant pour les éléments (chip frequencies) des fréquences approximativement deux fois plus élevées que celles du système GLONASS. La raison tient non seulement à la plus grande séparation en fréquence par rapport aux bandes de la radioastronomie, mais également au meilleur filtrage des bandes latérales lointaines et à l'absence dans le spectre de pointes de fréquence en bande étroite. Des projets visant à éliminer les brouillages que cause le système GLONASS à la radioastronomie – en éloignant les fréquences exigées de la bande attribuée à ce service et en renforçant le filtrage au niveau des satellites – sont nés d'une concertation entre l'administration GLONASS et le Comité interunions pour l'attribution de fréquences à la radioastronomie et à la science spatiale (IUCAF) et un premier train de mesures a maintenant été adopté pour améliorer la situation. Le problème que pose le système GLONASS illustre bien, néanmoins, le danger que représente pour la radioastronomie l'utilisation par des satellites de la technique de modulation DSSS en l'absence de filtre.

TABLEAU 1

Seuils de brouillage préjudiciable aux observations de radioastronomie dans les bandes attribuées à titre primaire à ce service

Bande de la radioastronomie	Puissance surfacique (dB(W/m²))	Densité spectrale (dB(W/(m² · Hz)))
13,36-13,41 MHz	-201	-248
25,55-25,67 MHz	-199	-249
73,0-74,6 MHz	-196	-258
150,05-153,0 MHz	-194	-259
322,0-328,6 MHz	-204	-258
406,1-410,0 MHz	-189	-255
608-614 MHz	-185	-253
1 400-1 427 MHz	-196	-255
1 610,6-1 613,8 MHz	-194	-238
1 660-1 670 MHz	-194	-251
2 690-2 700 MHz	-177	-247
4 990-5 000 MHz	-171	-241
10,6-10,7 GHz	-160	-240
15,35-15,4 GHz	-156	-233
22,21-22,5 GHz	-162	-233
23,6-24,0 GHz	-161	-233
31,3-31,8 GHz	-141	-228
42,5-43,5 GHz	-153	-227
48,94-49,04 GHz	-152	-209
79-94 GHz	-148	-228
136-158,5 GHz	-144	-223
200-231,5 GHz	-139	-218
250-275 GHz	-137	-216

TABLEAU 2

Affaiblissement de propagation dans le sens espace-Terre

Altitude du satellite, <i>h</i> (km)	Affaiblissement géométrique (dB)
250	119
500	125
750	128
1 000	131
2 000	137
5 000	145
10 000	151
20 000	157
35 800 ⁽¹⁾	162

⁽¹⁾ Satellite géostationnaire (la période est égale à un jour sidéral). Dans ce cas-ci, il est souhaitable que la puissance surfacique ou la densité spectrale admissible soit ajustée de -15 dB pour que le service de radioastronomie puisse effectuer des observations à moins de 5° d'un satellite en orbite géostationnaire (voir la Recommandation UIT-R RA.769, § 2.1 de l'Annexe 1).

Il se peut que l'on ne puisse pas parvenir à éliminer les bandes latérales non désirées du spectre étalé à proximité de la porteuse en utilisant des filtres calés à la fréquence porteuse si la porteuse du spectre en question est voisine de la bande attribuée à la radioastronomie. Pour en réduire les effets, une autre méthode consiste à modifier le processus de modulation. Les techniques modernes de traitement numérique (la modulation par déphasage minimal avec filtre gaussien par exemple) permettent de conformer le spectre de façon précise, en agissant au niveau de la bande de base des signaux à spectre étalé.

Des problèmes de brouillage dus aux bandes latérales étendues du spectre étalé ou à d'autres rayonnements non désirés émis par des satellites pourraient se poser par suite de l'attribution au service mobile par satellite pour des émissions espace-Terre des bandes 137-138 MHz, 387-390 MHz et 400,15-401 MHz; les bandes attribuées à la radioastronomie sont dans ce cas 150,05-153 MHz, 322-328,6 MHz, 406,1-410 MHz et éventuellement 608-614 MHz. Dans un grand nombre de ces cas, les émissions devraient en effet être de type DSSS. Or, les bandes de radioastronomie en question comptent parmi celles qui sont utilisées pour l'observation des émissions, fortement décalées vers le rouge, de la raie de l'hydrogène neutre, émissions qui permettent l'étude des parties les plus distantes de l'univers. Les bandes attribuées à la radioastronomie au-dessous de 1 400 MHz constituent un champ d'exploration exceptionnel, de la plus haute importance scientifique, que ne peuvent pas remplacer des observations dans d'autres bandes de fréquences. Le nouveau radiotélescope géant à ondes métriques installé en Inde est l'exemple d'une grande installation conçue précisément pour effectuer des recherches dans ce domaine scientifique; la perte des bandes mentionnées ci-dessus lui porterait un coup fatal.

5.2 Modulation de phase des signaux numériques

La transmission de données numériques à l'aide de la modulation par inversion de phase (MDP-2) ou par quadrature de phase (MDP-4) donne des spectres de la même forme en sinus carré que le spectre avec étalement en séquence directe. Dans ce cas, T dans l'équation (2) représente une fois la période binaire si la MDP-2 est utilisée et deux fois dans le cas de l'utilisation de la MDP-4. Pour des débits de données élevés, les bandes latérales peuvent être aussi gênantes que dans le cas d'étalement du spectre et il est possible d'appliquer les mêmes solutions, à savoir le filtrage ou l'affaiblissement des bandes latérales dans le processus de modulation.

Par exemple, un problème potentiel pour la radioastronomie est posé par l'attribution, par la Conférence administrative mondiale des radiocommunications chargée d'étudier les attributions de fréquences dans certaines parties du spectre (Malaga-Torremolinos, 1992) (CAMR-92), de la bande 1 452-1 492 MHz à la radiodiffusion audionumérique (RAN). Cette bande est attribuée aux systèmes de Terre et aux systèmes à satellites. Les bandes latérales de ces émissions situées dans la bande 1 400-1 427 MHz attribuée à la radioastronomie pourraient, si elles ne sont pas suffisamment affaiblies, excéder le seuil de brouillage défini pour la radioastronomie. Il existe un système adopté de modulation dénommé «multiplexage par répartition en fréquence orthogonale codée» (MRFOC) comportant 1 536 porteuses individuelles à modulation MDP-4, et dont le spectre de rayonnement est analogue à celui de l'équation (2), avec $T = 1,25$ ms. Chacune des porteuses est modulée numériquement en bande étroite. L'espacement des porteuses est de 1 kHz. Le spectre composite résultant est plat sur une bande de 1,54 MHz, puis s'atténue abruptement d'environ 45 dB en bordure de bande. Le niveau de la bande latérale extrême diminue approximativement en fonction de l'inverse du carré de la fréquence f^{-2} , mesurée à partir du centre de la bande composite. Un filtrage additionnel peut être nécessaire si l'on veut éviter que la densité de puissance surfacique globale non désirée en bande étroite ne dépasse le seuil de brouillage fixé pour la radioastronomie. Un tel filtrage ne pose aucun problème de fonctionnement au système MRFOC, qui est spécifiquement conçu pour tolérer des filtrages additionnels. Au cas où une autre forme de modulation serait utilisée pour la RAN dans cette bande, on pourrait observer un considérable problème de brouillage.

6 Rayonnements non essentiels et émissions hors bande provenant d'émetteurs de Terre

Les rayonnements non essentiels et les émissions hors bande provenant d'émetteurs de Terre sont moins gênants pour la radioastronomie que les rayonnements émis par des satellites ou des aéronefs, étant donné que les observatoires de radioastronomie sont généralement situés dans des endroits très reculés, choisis pour l'effet d'écran que leur relief produit. Toutefois, avec l'essor du service mobile par satellite, on prévoit que les émissions en liaison montante provenant de stations de Terre dans la bande 1610-1626,5 MHz entreront en conflit avec l'utilisation par la radioastronomie de la bande 1610,6-1613,8 MHz. Comme le service de radioastronomie a une attribution à titre primaire dans la bande 1610,6-1613,8 MHz, qui est également protégée, dans le cadre du renvoi 5.364 du RR, contre les rayonnements non désirés du SMS exploité dans la bande 1610-1626,5 MHz, la coordination est nécessaire. Les liaisons montantes de certains systèmes devant utiliser la technique DSSS, il est possible, sans coordination, que leurs bandes latérales soient source de brouillage, même lorsque le lobe central utile du spectre qu'elles émettront se situera à l'extérieur de la bande attribuée à la radioastronomie.
