

RECOMMANDATION UIT-R SA.1280*

**CHOIX DES CARACTÉRISTIQUES D'ÉMISSION DES CAPTEURS ACTIFS
SPATIOPORTÉS VISANT À ATTÉNUER LES RISQUES DE BROUILLAGE
CAUSÉ AUX RADARS TERRESTRES FONCTIONNANT DANS
LES BANDES COMPRISES ENTRE 1 ET 10 GHz**

(Question UIT-R 213/7)

(1997)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que des capteurs actifs spatioportés peuvent être exploités dans des bandes de fréquences communes avec des systèmes des services de radiolocalisation et de radionavigation;
- b) que les capteurs actifs spatioportés peuvent présenter des caractéristiques techniques susceptibles de causer des brouillages inacceptables aux radars terrestres fonctionnant dans les bandes de fréquences comprises entre 1 et 10 GHz;
- c) que l'expérience acquise au cours des vingt dernières années en matière de partage des bandes n'a fait apparaître aucun cas de brouillage préjudiciable;
- d) que certains radars terrestres sont spécialement conçus pour offrir un gain de traitement par rapport à certains types de brouillage par impulsions;
- e) que la valeur exacte du gain de traitement d'un radar terrestre par rapport à un type particulier de brouillage pulsé peut ne pas être connu;
- f) que certaines caractéristiques techniques des capteurs spatioportés peuvent être adaptées afin d'améliorer la compatibilité avec les radars terrestres, mais que cette souplesse est limitée par les exigences de performance imposées aux capteurs,

recommande

- 1 que la méthodologie donnée dans l'Annexe 1 puisse être utilisée pour améliorer les caractéristiques d'émission des capteurs actifs spatioportés afin de renforcer la compatibilité avec les radars terrestres exploités dans des bandes de fréquences communes;
- 2 d'utiliser de préférence les critères de partage et de brouillage spécifiques déjà établis pour une bande de fréquences donnée de préférence au critère générique donné dans l'Annexe 1.

* La présente Recommandation a été établie en commun par les Commissions d'études 7 et 8 des radiocommunications, et toute révision devra également être entreprise en commun.

1 Introduction

La méthodologie présentée dans la présente Annexe permet de déterminer si des signaux brouilleurs reçus par un radar terrestre émis par un capteur actif spatioporté peuvent compromettre le bon fonctionnement du radar, lorsque ce dernier est exploité dans la même bande de fréquences que le capteur. Les calculs portent essentiellement sur un certain nombre de paramètres du capteur dont les valeurs peuvent être choisies de manière à améliorer la situation de partage.

Les bandes de fréquences inférieures à 10 GHz visées par la présente méthodologie sont les suivantes: 1 215-1 300 MHz; 3 100-3 300 MHz; 5 250-5 350 MHz; 8 550-8 650 MHz et 9 500-9 800 MHz. Ces bandes sont communément appelées par les radaristes bande L, bande S, bande C et bande X (pour les deux dernières) respectivement. Compte tenu de leurs caractéristiques, les bandes L et S sont assez souvent utilisées pour les radars de recherche et de surveillance tandis que les bandes C et X sont souvent utilisées pour les radars de poursuite.

2 Calcul du brouillage causé aux radars terrestres

Le niveau de puissance moyen du signal brouilleur, I (dBW), reçu par un radar terrestre en provenance d'un capteur spatioporté est donné par la formule:

$$I = 10 \log P_t + 10 \log (\tau PRF) + G_t + G_r - (32,44 + 20 \log (fR)) + OTR - PG \quad (1)$$

où:

P_t : puissance de crête d'émission du capteur spatioporté (W)

τ : largeur d'impulsion du capteur spatioporté (s)

PRF : fréquence de récurrence des impulsions du capteur spatioporté (Hz)

G_t : gain d'antenne du capteur spatioporté dans la direction du radar terrestre (dBi)

G_r : gain d'antenne du radar terrestre dans la direction du capteur spatioporté (dBi)

f : fréquence (MHz)

R : distance entre le capteur et le radar (km)

OTR : rejet à la fréquence d'accord du récepteur radar (dB)

PG : gain de traitement (dB), élimination des signaux parasites apportée par le système de traitement du signal dans le récepteur radar (supposé être nul s'il n'est pas connu).

L'équation (1) donne le niveau de puissance moyen du signal brouilleur. Ce niveau de puissance est utilisé lorsqu'on peut déterminer qu'il convient de le faire. (Par exemple, un radar qui effectue une transformée de Fourier rapide sur le signal reçu va étaler les diverses composantes du signal pulsé sur un certain nombre de secteurs, ce qui équivaut à un moyennage du niveau de signal brouilleur moyenné.) Le terme rejet à la fréquence d'accord est donné par la formule:

$$OTR = 10 \log (B_r/B_t) \quad \text{pour } B_r \leq B_t \quad (2a)$$

$$= 0 \quad \text{pour } B_r > B_t \quad (2b)$$

où:

B_r : largeur de bande du récepteur radar

B_t : largeur de bande du signal brouilleur émis.

Si l'on considère le signal brouilleur de crête, le deuxième terme de l'équation (1) doit être ignoré et le rejet à la fréquence d'accord est calculé à partir des équations suivantes:

Impulsion d'entrée sans modulation de fréquence:

$$OTR = 20 \log (B_r \tau) \quad \text{pour } B_r \tau < 1 \quad (3a)$$

$$= 0 \quad \text{pour } B_r \tau > 1 \quad (3b)$$

Impulsion d'entrée avec modulation de fréquence:

$$OTR = 10 \log \left(\frac{B_r^2 \tau}{B_c} \right) \quad \text{pour } \frac{B_r^2 \tau}{B_c} < 1 \quad (4a)$$

$$= 0 \quad \text{pour } \frac{B_r^2 \tau}{B_c} > 1 \quad (4b)$$

où:

B_r : largeur de bande FI du radar terrestre

B_c : largeur de bande parasite du capteur spatioporté

τ : largeur d'impulsion du capteur.

3 Critères de brouillage applicables aux radars terrestres

Les critères de brouillage généraux applicables aux radars terrestres ont été formulés sur la base des travaux préliminaires du GTM 7-8R; lorsque des critères spécifiques existent pour des bandes de fréquences ou systèmes particuliers, il convient de les utiliser.

3.1 Radars de surveillance

On suppose que le rapport signal/bruit à la réception des radars de surveillance peut ne pas être dégradé de plus de 0,5 dB pendant un temps égal à la période de balayage arbitrairement fixée à 10 s. Cela correspond à un rapport puissance brouilleuse/puissance de bruit de -9 dB dans l'étage FI du récepteur. On considère que le niveau de puissance moyen du signal brouilleur est un paramètre pertinent dans le cas des radars de surveillance.

3.2 Radars de poursuite

Les radars de poursuite utilisent souvent des «fenêtres de distance» afin d'exclure tous les échos qui ne correspondent pas aux distances spécifiques observées. Une considération importante dans la détermination de la sensibilité d'un radar de poursuite à un train d'impulsions brouilleuses est la fraction des impulsions brouilleuses qui coïncident avec la fenêtre de distance. La coïncidence des impulsions brouilleuses avec la fenêtre de distance dépendra de la façon dont les fréquences de récurrence des impulsions utiles et parasites sont liées (cas I) ou non (cas II) par des multiples entiers. La fraction d'impulsions coïncidentes, f_c , est donnée par les formules suivantes:

$$f_c = \frac{GCF(PR F_i, PR F_g)}{PR F_g} \quad \text{pour le cas I} \quad (5a)$$

$$f_c = PR F_i (\tau_g + \tau_i) \quad \text{pour le cas II} \quad (5b)$$

où:

$PR F_i$: fréquence de récurrence des impulsions brouilleuses

$PR F_g$: fréquence de récurrence de la fenêtre

$GCF(PR F_i, PR F_g)$: plus grand facteur commun de $PR F_i$ et de $PR F_g$

τ_i : durée des impulsions brouilleuses

τ_g : durée de la fenêtre.

Il convient de noter que lorsque $\tau_i > \tau_g$ et que les fréquences PRF utiles et parasites ne sont pas liées par des multiples entiers (cas II), f_c correspond approximativement au coefficient d'utilisation des impulsions brouilleuses. On considère que cette situation correspond au cas général et on l'utilise ci-après pour la détermination du seuil de dégradation pour un radar de poursuite.

Afin de pouvoir déterminer très précisément la position des cibles, les radars de poursuite utilisent des antennes à très grand gain avec des faisceaux principaux étroits bien définis. Un mécanisme permet d'asservir l'axe de visée du faisceau principal de l'antenne sur la cible; cet asservissement est commandé par un signal d'erreur produit par l'erreur angulaire entre la cible et l'axe de visée de l'antenne. Les signaux parasites captés par le radar peuvent augmenter cette erreur.

Un seuil de dégradation pour un radar de poursuite, exprimé comme une fraction admissible d'impulsions brouilleuses coïncidentes, f_c , en fonction du rapport signal/brouillage à la sortie FI du récepteur est donné par les formules suivantes:

$$f_c = \frac{a^2 - 1}{\frac{90B_r \tau}{(S/I - 1)} - 1} \quad \text{pour } S/I > 1 \quad (6a)$$

$$f_c = \frac{a^2 - 1}{\frac{90B_r \tau}{(I/S - 1)} - 1} \quad \text{pour } S/I < 1 \quad (6b)$$

où:

a : facteur associé à l'erreur de poursuite totale qui tient compte de la dégradation due au brouillage (par exemple: une valeur de $a = 1,1$ donne une augmentation de 0,1% ou de 10% due au brouillage)

B_r : largeur à 3 dB du filtre FI du radar

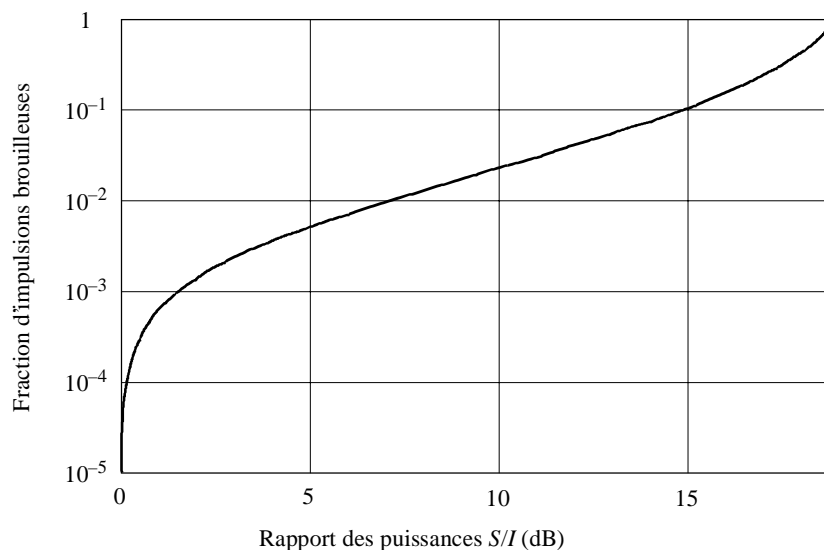
τ : durée des impulsions cibles (il convient de noter que $B_r \tau \cong 1$ pour un radar de poursuite)

S/I : rapport de puissance signal/brouillage à la sortie FI du radar (non exprimé en dB).

La courbe de la Fig. 1 représente la proportion d'impulsions coïncidentes en fonction du rapport S/I à la sortie FI du radar, correspondant à une augmentation de 10% de l'erreur de poursuite du radar due au brouillage. La proportion d'impulsions coïncidentes est égale approximativement au coefficient d'utilisation du capteur (6%), de sorte qu'un rapport S/I de 13 dB correspond à une erreur de poursuite de 10%. On supposera que le rapport S/I doit être supérieur ou égal à 13 dB pour des périodes de temps supérieures à 3 s. (Etant donné que le critère de brouillage a été établi sur la base d'une impulsion brouilleuse coïncidente avec la fenêtre de distance du radar, il faut utiliser la puissance de crête du signal brouilleur.)

FIGURE 1

**Rapport S/I du radar en fonction d'impulsions brouilleuses coïncidentes
(augmentation de 10% de l'erreur de poursuite)**



4 Exemple d'analyse d'un signal émis par un capteur spatioporté et brouillant des radars terrestres

4.1 Caractéristiques techniques

4.1.1 Capteurs spatioportés

Le Tableau 1 donne les caractéristiques d'un capteur spatioporté type utilisé dans l'analyse ci-après. Les Tableaux 2, 3, 4 et 5 donnent les caractéristiques de gain d'antenne du capteur spatioporté.

TABLEAU 1

Caractéristiques du radar à synthèse d'ouverture spatioporté

Paramètre	Valeur
Altitude de l'orbite (km)	400
Inclinaison de l'orbite (degrés)	57
Puissance d'émission (W)	1 500
Longueur d'impulsion (μ s)	33,8
Fréquence de récurrence des impulsions (Hz)	1 736
Facteur d'utilisation	0,059
Modulation de l'impulsion	MF linéaire
Largeur de bande RF (MHz)	10

TABLEAU 2

Diagramme de gain d'antenne à 1 240 MHz du radar à synthèse d'ouverture spatioporté

Diagramme	Gain $G(\theta)$ (dBi) en fonction de l'angle θ hors axe (degrés)	Plage angulaire
Vertical (élévation)	$G_v(\theta_v) = 36,4 - 0,478(\theta_v)^2$ $G_v(\theta_v) = 33,8 - 1,0 \theta_v$ $G_v(\theta_v) = -11$	$0^\circ < \theta_v < 3,6^\circ$ $3,6^\circ < \theta_v < 45^\circ$ $\theta_v > 45^\circ$
Horizontal (azimut)	$G_h(\theta_h) = 0,0 - 19,6(\theta_h)^2$ $G_h(\theta_h) = -24,5 - 0,47 \theta_h$ $G_h(\theta_h) = -30,5$	$0^\circ < \theta_h < 1,13^\circ$ $1,13^\circ < \theta_h < 12,7^\circ$ $\theta_h > 12,7^\circ$
Diagramme de faisceau	$G(\theta) = \{G_v(\theta_v) + G_h(\theta_h), -11\} \max$	

TABLEAU 3

Diagramme de gain d'antenne à 3 200 MHz du radar à synthèse d'ouverture spatioporté

Diagramme	Gain $G(\theta)$ (dBi) en fonction de l'angle hors nadir (degrés)	Plage angulaire
Elévation	$G_{el}(\theta_{el}) = 39,7 - 0,397(\theta_{el})^2$ $G_{el}(\theta_{el}) = 19,7$ $G_{el}(\theta_{el}) = 4,7$ $G_{el}(\theta_{el}) = 17,7$	$0^\circ < \theta_{el} < 7,1^\circ$ $7,1^\circ < \theta_{el} \leq 30^\circ$ $30^\circ < \theta_{el} \leq 60^\circ$ $60^\circ < \theta_{el} \leq 90^\circ$
Azimut	$G_{az}(\theta_{az}) = 0,0 - 68,0(\theta_{az})^2$ $G_{az}(\theta_{az}) = -12,0$ $G_{az}(\theta_{az}) = 0,0 - 9,0(\theta_{az})$ $G_{az}(\theta_{az}) = -35,0$	$0^\circ < \theta_{az} < 0,42^\circ$ $0,42^\circ < \theta_{az} \leq 1,32^\circ$ $1,32^\circ < \theta_{az} \leq 3,9^\circ$ $\theta_{az} > 3,9^\circ$
Diagramme de faisceau	$G(\theta) = \{G_{el}(\theta_{el}) + G_{az}(\theta_{az}), -8\} \max$	

TABLEAU 4

Diagramme de gain d'antenne à 5 300 MHz du radar à synthèse d'ouverture spatioporté

Diagramme	Gain $G(\theta)$ (dBi) en fonction de l'angle hors axe θ (degrés)	Plage angulaire
Vertical (élévation)	$G_v(\theta_v) = 42,7 - 0,478(\theta_v)^2$ $G_v(\theta_v) = 40,1 - 1,0 \theta_v$ $G_v(\theta_v) = -5$	$0^\circ < \theta_v < 3,6^\circ$ $3,6^\circ < \theta_v < 45^\circ$ $\theta_v > 45^\circ$
Horizontal (azimut)	$G_h(\theta_h) = 0,0 - 442(\theta_h)^2$ $G_h(\theta_h) = -25,0 - 2,2 \theta_h$ $G_h(\theta_h) = -31$	$0^\circ < \theta_h < 0,24^\circ$ $0,24^\circ < \theta_h < 2,7^\circ$ $\theta_h > 2,7^\circ$
Diagramme de faisceau	$G(\theta) = \{G_v(\theta_v) + G_h(\theta_h), -5\} \max$	

TABLEAU 5

Diagramme de gain d'antenne à 8 600 MHz et 9 650 MHz du radar à synthèse d'ouverture spatioporté

Diagramme	Gain $G(\theta)$ (dBi) en fonction de l'angle hors axe θ (degrés)	Plage angulaire
Vertical (élévation)	$G_v(\theta_v) = 44,0 - 0,397(\theta_v)^2$ $G_v(\theta_v) = 24,5$ $G_v(\theta_v) = 9,5$ $G_v(\theta_v) = 22,5$	$\theta_v < 7,1^\circ$ $7,1^\circ < \theta_v < 30^\circ$ $30^\circ < \theta_v < 60^\circ$ $\theta_v > 60^\circ$
Horizontal (azimut)	$G_h(\theta_h) = 0 - 612,2(\theta_h)^2$ $G_h(\theta_h) = -12$ $G_h(\theta_h) = 0 - 27,0 \text{ dB } (\theta_h)$ $G_h(\theta_h) = -35$	$\theta_h < 0,14^\circ$ $0,14^\circ < \theta_h < 0,44^\circ$ $0,44^\circ < \theta_h < 1,3^\circ$ $\theta_h > 1,3^\circ$
Diagramme de faisceau	$G(\theta) = \{G_v(\theta_v) + G_h(\theta_h), -3\} \min$	

4.1.2 Radars terrestres

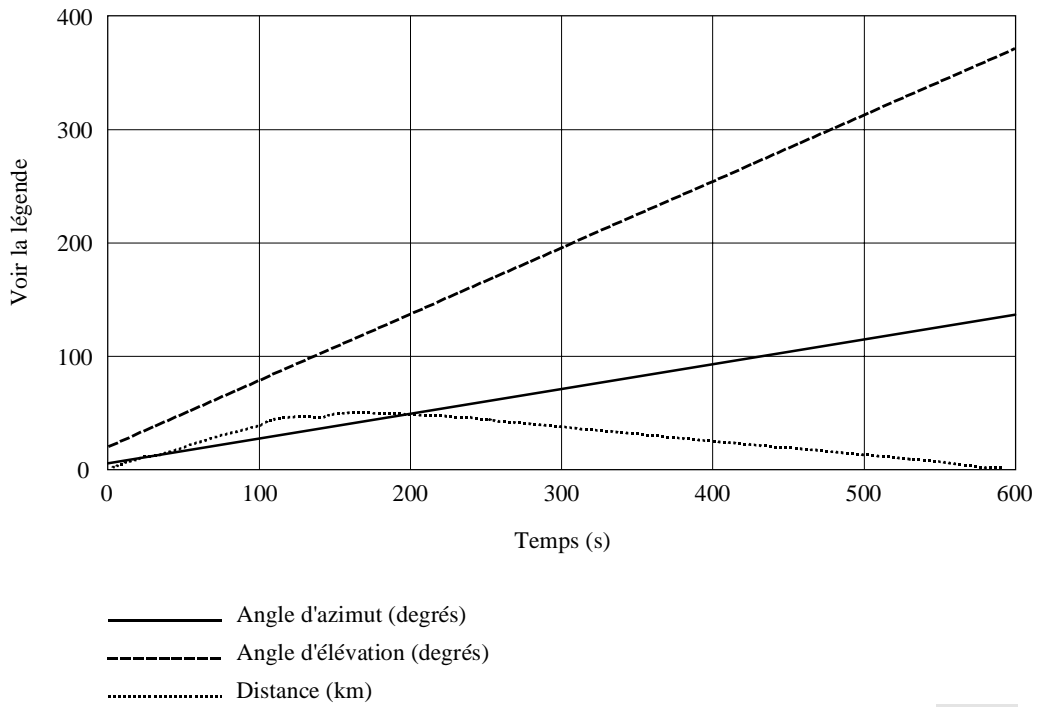
Un niveau de lobe latéral de $-5,38$ dBi (correspondant au gain minimum pour un diagramme de gain d'antenne de 38 dBi) est utilisé dans les calculs pour les radars de surveillance, étant donné que les conjonctions de faisceau principal sont rares et très brèves compte tenu des caractéristiques de balayage de ces radars. Le couplage de faisceaux principaux est plus probable dans le cas de radars de poursuite, qui peuvent pointer dans une direction spécifique pendant de longues périodes; un diagramme de gain d'antenne parabolique à gain très élevé (47 dBi) est utilisé pour les radars de poursuite. Pour les deux cas, on a supposé une largeur de bande FI de 1 MHz et un facteur de bruit de 5 dB.

4.2 Analyse et résultats

Une simulation de 1500 orbites du capteur spatioporté a été effectuée. L'événement de poursuite, pris pour hypothèse pendant la simulation dans le cas des radars de poursuite (bande C et bande X) est représenté à la Fig. 2. (Une cible ayant une surface équivalente radar de 5 dB/m^2 a été utilisée.) Les signaux parasites reçus ont été calculés pendant toute la période de simulation et comparés avec les critères. Le gain de traitement, tel que défini dans l'équation (1), a été supposé égal à zéro. Lorsque le critère n'était pas respecté, la simulation a été recommencée avec une réduction d'une unité de la puissance du signal parasite reçu. Cette procédure a été répétée jusqu'à ce que le critère soit respecté. Les résultats pour le capteur dont les caractéristiques sont données au Tableau 1 sont représentés dans les Fig. 3 à 6.

FIGURE 2

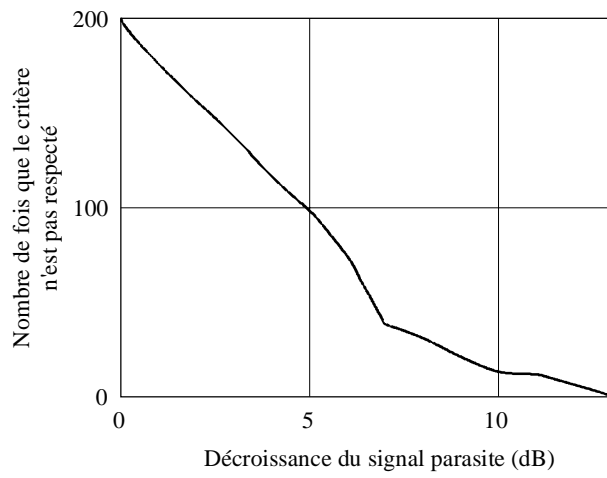
Événement de poursuite pris pour hypothèse pour le radar de poursuite



1280-02

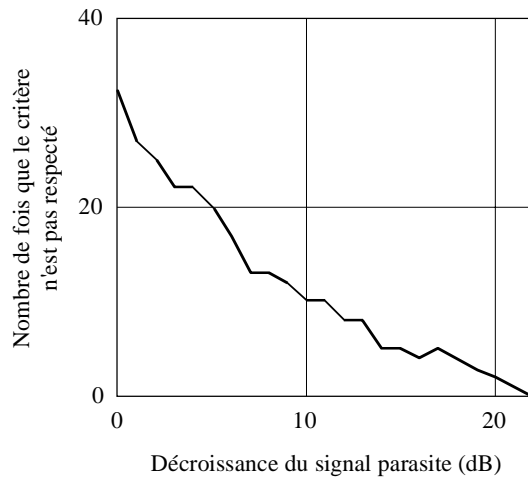
FIGURE 3

Radar en bande L (1 240 MHz)



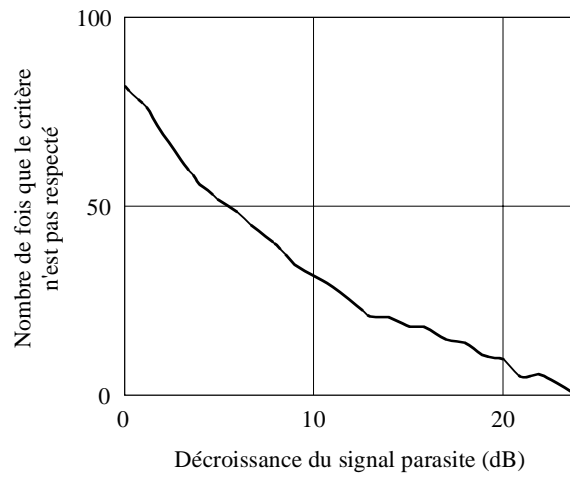
1280-03

FIGURE 4
Radar en bande S (3 200 MHz)



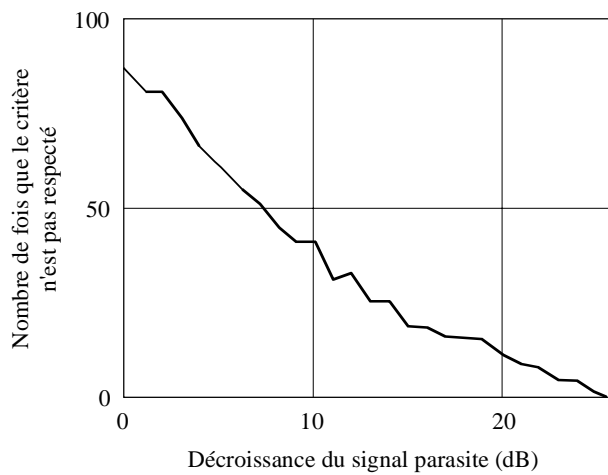
1280-04

FIGURE 5
Radar en bande C (5 300 MHz)



1280-05

FIGURE 6
Radar en bande X (8 600 MHz)



1280-06

5 Discussion des résultats de l'analyse

L'analyse des courbes des Fig. 2 à 6 montre qu'indépendamment de la façon dont les radars de poursuite ou les radars de surveillance sont considérés, le capteur dont les caractéristiques sont données au Tableau 1 peut être à l'origine d'un grand nombre d'événements de brouillage. Cependant, une diminution du niveau de puissance du signal brouilleur reçu par les radars terrestres peut améliorer fortement la situation. Une diminution de l'ordre de 13 et 20 dB, respectivement pour les radars de surveillance et les radars de poursuite, peut ramener le nombre d'événements de brouillage possibles à une valeur suffisamment faible et acceptable.

6 Procédure pour utiliser la méthodologie

La puissance de crête ou la puissance moyenne d'un capteur actif spatioporté doit être étudiée au cours des étapes de conception. Si cette puissance n'est pas inférieure de 13 à 20 dB à celle du capteur actif dont les caractéristiques sont données au Tableau 1, le capteur étudié est susceptible de causer des brouillages inacceptables aux radars terrestres de surveillance ou de poursuite (voir la Note 1). Les équations (1) à (4) peuvent être utilisées pour déterminer les paramètres qui peuvent être potentiellement ajustés au cours de la phase de conception du capteur spatioporté, afin d'améliorer la situation de partage avec les radars terrestres. On pourra, par exemple, ajuster la puissance d'émission, le gain d'antenne (en particulier dans les lobes latéraux), la largeur d'impulsion ou une largeur de bande de modulation de fréquence d'impulsions.

NOTE 1 – Lorsqu'on analyse la compatibilité entre un capteur spatioporté et un radar terrestre particulier, l'éventuel gain de traitement du radar terrestre doit être pris en considération étant donné que dans l'analyse, on a supposé que ce gain était nul. Cette hypothèse est valable pour le cas général étant donné que certains radars n'ont pas de gain de traitement. Si tous les radars dans la bande ont un certain gain de traitement une seule valeur devra être déterminée.

Considérons, par exemple, deux radars fonctionnant dans la bande 9 500-9 800 MHz, à savoir:

- un radar de poursuite ayant une largeur de bande FI de 1 MHz (radar 1)
- un radar d'interception aéroporté ayant une largeur de bande FI de 5 MHz (radar 2).

Si le capteur spatioporté décrit au Tableau 1 peut être utilisé avec une largeur d'impulsion et une bande passante des impulsions MF différente, tel qu'indiqué au Tableau 6, il est possible alors d'obtenir une diminution importante du niveau de puissance du signal parasite. La diminution du niveau de puissance du signal parasite obtenue dans cet exemple est pratiquement celle qui est nécessaire pour obtenir l'amélioration souhaitée de la situation de partage.

TABLEAU 6

Exemple de réduction de la puissance reçue en provenance du capteur parasite, obtenue en modifiant la durée d'impulsion du capteur et la largeur de bande des impulsions

	Nouvelle valeur de paramètre		ΔOTR (dB)	$\Delta P_{moy.}$ (dB)	ΔI (dB)
	τ (μs)	B_c (MHz)			
Radar 1	3	280	-19,7	Non disponible ⁽¹⁾	-19,7
Radar 2	3	280	-5,7	-10,5	-16,2

⁽¹⁾ On a estimé qu'il était justifié d'utiliser la puissance du signal brouilleur moyenne pour un radar aéroporté et la puissance de crête du signal brouilleur pour le radar de poursuite.

7 Conclusion

On a montré dans la présente Annexe qu'il devait être possible de respecter les critères de protection pour les radars terrestres en choisissant convenablement les caractéristiques du capteur actif spatioporté. Les paramètres qui peuvent être ajustés afin d'améliorer la compatibilité sont les suivants: puissance d'émission du capteur, diagramme de gain d'antenne, largeur d'impulsion, fréquence de récurrence des impulsions et largeur de bande des impulsions MF (le cas échéant).