

RECOMMANDATION UIT-R M. 1314*

**RÉDUCTION DES RAYONNEMENTS NON ESSENTIELS ÉMIS PAR LES SYSTÈMES
RADAR FONCTIONNANT DANS LES BANDES DES 3 GHz ET DES 5 GHz**

(Question UIT-R 202/8)

(1997)

Résumé

La présente Recommandation contient des informations sur certains paramètres de conception et caractéristiques des rayonnements non essentiels émis par les dispositifs de sortie radar à prendre en considération lors du choix de ces dispositifs pendant la phase de conception des radars. Elle préconise aussi l'emploi de certains types de ces dispositifs pour minimiser les rayonnements non essentiels harmoniques et non harmoniques.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que la partie du spectre radioélectrique à la disposition des services de radiorepérage est limitée;
- b) que le service de radionavigation est un service de sécurité au sens du numéro 953 (S4.10) du Règlement des radiocommunications et par ailleurs, que certains autres types de systèmes radar comme les radars météorologiques peuvent remplir des fonctions de sauvegarde de la vie humaine;
- c) que les largeurs de bande nécessaires permettant le bon fonctionnement des stations radar du service de radiorepérage sont importantes;
- d) que les nouveaux systèmes peuvent utiliser des technologies nouvelles, numériques ou autres, plus sensibles aux brouillages dus aux rayonnements non essentiels émis par les radars, en raison de leur puissance de crête élevée;
- e) que l'UIT-R étudie la question de l'utilisation efficace du spectre radioélectrique par les systèmes radar, et notamment les rayonnements non essentiels intrinsèques produits par divers types de dispositifs de sortie;
- f) que l'UIT-R étudie aussi les effets des rayonnements non désirés émis par les systèmes radar sur les systèmes du service fixe;
- g) que les brouillages causés aux stations des faisceaux hertziens du service fixe et aux stations terriennes du service fixe par satellite (SFS) ont été attribués aux rayonnements non essentiels des systèmes radar exploités au voisinage de 3 et 5 GHz dans le cadre des services de radionavigation, de radiolocalisation et de météorologie;
- h) que les rayonnements non essentiels émis par les systèmes radar peuvent, dans certains cas, causer des brouillages à des systèmes relevant d'autres services radioélectriques fonctionnant dans des bandes adjacentes ou dans des bandes ayant une relation harmonique, en particulier lorsque les caractéristiques techniques et opérationnelles des autres services radioélectriques sont modifiées et que ces modifications les rendent plus sensibles aux brouillages;
- j) que certaines caractéristiques comme la largeur de bande, la cohérence, la durée de vie prévue, le coût, le poids, la taille et la robustesse mécanique doivent être prises en considération pour spécifier les caractéristiques de conception des systèmes de radiorepérage,

recommande

- 1** d'utiliser pour le choix des dispositifs de sortie des radars lors de la phase de conception des radars, les informations contenues dans l'Annexe 1 sur les dispositifs de sortie et leurs caractéristiques de rayonnements non essentiels;
- 2** d'utiliser, dans la mesure du possible, pour les radars, des dispositifs de sortie à semi-conducteur ou des tubes de sortie à faisceau linéaire afin de réduire le niveau des rayonnements non essentiels non harmoniques;
- 3** d'utiliser pour les radars, si nécessaire et possible, des filtres de sortie pour atténuer le niveau des rayonnements non essentiels harmoniques et non harmoniques.

* Cette Recommandation doit être portée à l'attention de l'Organisation maritime internationale (OMI), de l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI), du Comité international radiomaritime (CIRM), de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et des Commissions d'études 1 et 9 des radiocommunications.

Réduction des rayonnements non essentiels émis par les systèmes radar fonctionnant dans les bandes des 3 GHz et des 5 GHz

1 Introduction

Il a été constaté ces dernières années une forte augmentation du nombre de cas de brouillages causés par des radars à des stations de faisceaux hertziens du service fixe fonctionnant au voisinage de 4, 5 et 6 GHz et à des stations terriennes du SFS fonctionnant au voisinage de 4 GHz. Cette augmentation a été attribuée aux niveaux élevés des rayonnements non essentiels émis par les radars, au développement de l'utilisation des modulations numériques dans le service fixe et le SFS et aussi à l'accroissement rapide du nombre de systèmes fonctionnant dans des bandes adjacentes ou harmoniques de celles utilisées par les radars de forte puissance. La présente Annexe a pour objet de donner des informations sur les rayonnements non essentiels intrinsèques émis par les dispositifs de sortie des radars, sur le choix de ces dispositifs lors de la phase de conception des radars et sur les techniques permettant de réduire les rayonnements non essentiels émis par les radars.

2 Paramètres de conception

La fonction ou la mission d'un radar détermine en grande partie ses caractéristiques et le choix du dispositif de sortie utilisé. Il existe une très grande variété de missions confiées aux radars: navigation, météorologie, anémométrie, surveillance, observation et cartographie, suivi de terrain, altimétrie, etc. Ces missions déterminent également certains paramètres que le concepteur ne maîtrise pas, il en est ainsi de la surface équivalente des cibles qui influe directement sur la puissance d'émission, le gain d'antenne et la sensibilité du récepteur nécessaires.

Par conséquent, le choix du dispositif de sortie radar a non seulement une incidence sur le type d'émetteur, mais aussi sur le type de récepteur radar et sur le système d'antenne. Ainsi pour un radar multifonctions, le choix du dispositif de sortie peut s'en trouver compliqué.

D'autres facteurs importants qui peuvent intervenir dans la conception d'un radar au niveau du choix du dispositif de sortie est son rendement énergétique (conversion énergie DC-puissance RF), sa largeur de bande instantanée (largeur de bande d'accord disponible sans réglage) et la cohérence impulsionnelle (déphasage entre impulsions, caractéristique importante pour le traitement Doppler), son poids, ses dimensions, sa robustesse mécanique, la durée de vie du dispositif et son prix.

Le Tableau 1 indique les caractéristiques de divers dispositifs de sortie prises en considération lors de la conception des systèmes radar. Ce Tableau montre que les caractéristiques de ces dispositifs varient fortement en termes de puissance de crête, de largeur de bande instantanée et de rendement énergétique. On doit accorder à ces paramètres la plus grande attention pour le choix du dispositif de sortie afin de s'assurer qu'ils correspondent bien à la (aux) mission(s) du radar. La caractéristique de rayonnements non essentiels de ces dispositifs n'intervient qu'après.

3 Caractéristiques de rayonnements non essentiels des dispositifs de sortie

Le niveau des rayonnements non essentiels produits par les émetteurs radar dépend du dispositif de sortie utilisé. Une bonne connaissance des rayonnements non essentiels produits par les divers dispositifs de sortie radar est essentielle pour obtenir une utilisation efficace du spectre et minimiser les brouillages causés aux services exploités dans des bandes adjacentes.

Le Tableau 2 indique les caractéristiques des rayonnements non essentiels (harmoniques et non harmoniques) produits par des dispositifs de sortie pour des radars fonctionnant dans les bandes des 3 GHz et des 5 GHz. Il a été constaté que les radars équipés des dispositifs de sortie à champs croisés produisent des niveaux de rayonnements non essentiels non harmoniques intrinsèques qui nécessitent l'emploi de filtres lorsque les limites des rayonnements non essentiels sont supérieures à -60 dBc environ. Les tubes à faisceau linéaire et les dispositifs de sortie à semi-conducteur produisent des rayonnements non essentiels intrinsèques inférieurs à -100 dBc. Tous les dispositifs de sortie radar produisent des rayonnements non essentiels harmoniques intrinsèques dont les niveaux sont compris entre -15 et -55 dBc, et nécessitent donc l'emploi de filtres supprimeurs des rayonnements non essentiels. Pour les radars à balayage électronique (à réseau déphaseur), le filtrage est parfois impossible.

TABLEAU 1

Caractéristiques essentielles des dispositifs de sortie radar fonctionnant dans les bandes des 3 GHz et des 5 GHz

Dispositif de sortie	Plage de puissance crête de sortie (kW)	Efficacité énergétique (%)	Largeur de bande instantanée à 1 dB (% de la fréquence porteuse)	Cohérence impulsionnelle	Poids (kg)	Dimensions	Robustesse mécanique	Durée de vie ⁽¹⁾	Prix relatif ⁽²⁾
<i>Champs croisés:</i>									
Amplificateurs à champs croisés	60-5 000	40-65	5-12	Oui	25-65	Réduites	Bonne	1,0	Faible
Magnétron (non verrouillé)	20-1 000	35-75	(3)	Non	1-25			1,0	
Magnétron (verrouillé)	20-1 000	35-75	(3)	Oui	1-25			1,0	
Magnétron coaxial	10-3 000	35-50	(3)	Non	2-55			5,4	
<i>Faisceau linéaire:</i>									
Tube à ondes progressives à cavité couplée	25-200	20-40	10-15	Oui	10-135	Importantes	Bonne	7,4	Elevé Moyen Elevé
Klystron	20-10 000	30-50	1-12	Oui	25-270			13,5	
Twystron	2 000-5 000	30-40	1-12	Oui	55-65			10,4	
<i>Transistors (Modules en classe C parallèles):</i>									
Bipolaires en silicone	10-90	20-30	10-30	Oui	0,5-2,5 par module	Réduites	Excellente	15	Elevé
Transistors à effet de champ à l'arséniure de gallium ⁽⁴⁾	0,5-5,0	10-25	10-30						

(1) Durée de vie relative normalisée par rapport à celle d'un magnétron conventionnel.

(2) Dépend du volume de production.

(3) Bien que la largeur de bande instantanée des magnétrons soit nulle, il est possible par syntonisation de faire varier sa fréquence de $\pm 10\%$ au maximum par rapport à sa fréquence nominale.

(4) Les modules bipolaires en silicone (Si) sont généralement utilisés en dessous de 3,5 GHz et les modules à l'arséniure de gallium (AsGa) dans la bande des 5 GHz.

(5) Dépend du nombre de modules associés dans l'étage de sortie.

TABLEAU 2

Caractéristiques de rayonnements non essentiels des dispositifs de sortie utilisés dans les systèmes de radiorepérage à impulsions fonctionnant dans les bandes des 3 GHz et des 5 GHz

Dispositif de sortie	Niveau des rayonnements non essentiels			
	Non harmoniques (dBc) sur 1 MHz	Harmoniques ^{(1), (2)} (dBc)		
		2 ^e	3 ^e	4 ^e
<i>Champs croisés:</i>				
Amplificateurs à champs croisés	-35 à -50 ⁽⁴⁾	-25	-30	-45
Magnétron (non verrouillé) ⁽³⁾	-65 à -80 ⁽⁴⁾	-40	-20	-45
Magnétron (verrouillé) ⁽³⁾	-75 à -90 ⁽⁴⁾	-40	-20	-45
Magnétron coaxial ⁽³⁾	-60 à -75 ⁽⁴⁾	-40	-20	-45
<i>Faisceau linéaire:</i>	(5)			
Tube à ondes progressives à cavité couplée	-105 à -115	-20	-25	-35
Klystron	-110 à -120	-20	-25	-35
Twystron	-105 à -115	-20	-25	-35
<i>Transistors (Modules en classe C parallèles):</i>				
Bipolaires en silicium	-100 à -110	-45	-55	-65
Transistors à effet de champ à l'arséniure de gallium	-100 à -110	-35	-45	-55

- (1) Les niveaux des rayonnements non essentiels harmoniques sont indiqués en valeur nominale. En général, le niveau des rayonnements non essentiels s'étend entre +5 et -10 dB par rapport aux valeurs nominales.
- (2) Le niveau des rayonnements harmoniques peut être ramené à une valeur inférieure à -100 dBc au moyen d'un filtre d'harmoniques passe-bas.
- (3) Les magnétrons présentent des modes intrinsèques $\pi - 1$ dont le niveau peut être inférieur de 40 dB seulement par rapport à la porteuse. Ces modes sont intermittents et de brève durée, ils apparaissent lors du démarrage des oscillations.
- (4) Le niveau des rayonnements non harmoniques d'un dispositif à champs croisés peut être ramené à une valeur inférieure à -100 dBc au moyen d'un filtre passe-bande guide d'ondes. La perte d'insertion associée à l'utilisation de ces filtres est de quelques dixièmes de décibels.
- (5) Les dispositifs de sortie à faisceau linéaire peuvent présenter des niveaux de rayonnement non essentiel non harmonique au voisinage de la porteuse compris entre -80 et -90 dBc selon la sélectivité totale de la cavité.

4 Filtres de sortie pour radars

Le Tableau 2 indique que la nécessité d'un filtrage des rayonnements non essentiels dépend pour beaucoup du choix du dispositif de sortie du radar. Toutefois, comme indiqué plus haut, le choix d'un dispositif de sortie pour un radar ne peut pas être entièrement dicté par des considérations relatives aux rayonnements non essentiels. Compte tenu du niveau élevé des rayonnements non essentiels harmoniques intrinsèques produits par les dispositifs de sortie, il faut utiliser en général pour éliminer ces rayonnements, dans la mesure du possible, des filtres d'harmoniques (passe-bas). Afin d'atténuer les rayonnements non essentiels produits par des radars de moyenne ou de forte puissance dans des bandes adjacentes à celles attribuées au service de radiorepérage, il est nécessaire de placer des filtres passe-bande en sortie des émetteurs radar équipés de certains dispositifs de sortie. Ces filtres seront distincts des filtres harmoniques car la grande largeur de bande à éliminer des filtres suppresseurs d'harmoniques n'est pas compatible avec la caractéristique de coupure brusque des filtres éliminateurs des rayonnements dans les bandes adjacentes. Le nombre de filtres nécessaires peut être bien supérieur à deux, toutefois dans le cas de radars à réseau actif, il faudra intercaler un ou deux filtres entre chaque dispositif de sortie et l'élément ou le sous-réseau d'antenne qu'il alimente. Plusieurs dizaines de filtres seront alors nécessaires.

Le coût de ces filtres peut être important, car les filtres utilisés seront de type non conventionnel, avec parfois pressurisation ou évacuation, afin de pouvoir supporter les fortes puissances en jeu et obtenir la caractéristique d'élimination recherchée sur une largeur de bande importante. Dans les bandes considérées, l'affaiblissement d'insertion des filtres éliminateurs des harmoniques et des filtres passe-bande pour radars est compris entre 0,1 et 0,7 dB. Cet affaiblissement sera pratiquement doublé s'il faut utiliser à la fois des filtres harmoniques et des filtres passe-bande. Compte tenu des divers facteurs qui interviennent dans le fonctionnement d'un radar, la dégradation des caractéristiques de détection et de poursuite qui en résultera sera généralement imperceptible, mais il n'en demeure pas moins vrai qu'un affaiblissement de 0,2 dB représente une forte perte de puissance (par exemple, 47 kW de puissance de crête pour un radar de 1 MW). L'émetteur devra être bien plus puissant dans le cas de compensation de la baisse de performance, étant donné qu'il faut supposer que tous les moyens les plus économiques pour améliorer les performances auront déjà été utilisés. Ainsi, un affaiblissement de 0,4 dB correspond à une diminution de 2,3% de la portée, ce qui est négligeable pour certains radars mais pas pour d'autres. Le taux d'ondes stationnaires de ces deux types de filtres est compris entre 1,1 et 1,3.

L'utilisation de filtres de sortie est aussi sujette à des considérations de puissance admissible, d'encombrement et de poids de ces filtres, surtout lorsqu'il s'agit de radars mobiles. La taille et le poids peuvent être des considérations déterminantes dans le cas de radars mobiles à réseau actif. Le filtrage dans des bandes très voisines de celles utilisées par le radar nécessite l'emploi de filtres ayant des courbes de sélectivité en cloche abrupte et par conséquent le stockage d'énergies très importantes, ce qui crée un risque de panne (ou abaisse le niveau de puissance admissible) et peut aussi introduire des distorsions dans la bande passante – autre considération essentielle dans les radars à réseau actif. Pour ramener les rayonnements non essentiels à un niveau donné, l'affaiblissement doit être d'autant plus important que le radar est puissant; parallèlement, le nombre de sections de filtre nécessaires sera également plus grand et en conséquence l'affaiblissement d'insertion, l'encombrement et le poids seront plus élevés.

La meilleure façon de mettre en œuvre un filtrage au niveau d'un émetteur consiste à le prévoir dès la phase de conception même du radar. L'ajout de filtres à des radars existants a été réalisé dans de nombreux cas sans dégradation importante des performances des systèmes; dans certains autres cas, des problèmes de panne sont apparus après l'ajout de filtres suppresseurs des rayonnements dans les bandes adjacentes.

5 Evolution des radars

Le choix de dispositifs de sortie est déterminé par les progrès techniques réalisés dans deux domaines principaux:

- le traitement numérique du signal qui conduit à un développement rapide des radars Doppler qui nécessitent une grande cohérence entre impulsions (dispositifs à faisceau linéaire et dispositifs à semi-conducteur);
- la mise au point de dispositifs de forte puissance à semi-conducteur (modulaires/monolithiques ou discrets (réseau déphaseur)).

Cette évolution aura une influence sur la réduction des niveaux des rayonnements non essentiels émis par les radars de la nouvelle génération.
