

RAPPORT UIT-R M.2076

Facteurs permettant de réduire les brouillages causés par des radars du service de radiolocalisation et du service d'exploration de la Terre par satellite/service de recherche spatiale (active) aux radars maritimes et de radionavigation aéronautique dans les bandes 9,0-9,2 et 9,3-9,5 GHz et entre les radars du service d'exploration de la Terre par satellite/service de recherche spatiale (active) et les radars de radiolocalisation dans les bandes 9,3-9,5 et 9,8-10,0 GHz

(2006)

1 Introduction

Il est demandé dans la Question UIT-R 234/8 de procéder à une étude des caractéristiques techniques, des critères de qualité de fonctionnement et d'autres facteurs des systèmes de radiolocalisation et de radionavigation dans les bandes 9 000-9 200 MHz et 9 300-9 500 MHz ainsi que des critères de brouillage applicables à ces systèmes. Par ailleurs, le point 1.3 de l'ordre du jour de la CMR-07 est le suivant: conformément à la Résolution 747 (CMR-03), envisager le relèvement au statut primaire avec égalité des droits des attributions au service de radiolocalisation dans les bandes 9 000-9 200 MHz et 9 300-9 500 MHz et l'extension de 200 MHz, dans une bande contiguë, des attributions existantes à titre primaire au service d'exploration de la Terre par satellite (SETS) (active) et au service de recherche spatiale (active) dans la bande 9 500-9 800 MHz. Les caractéristiques des radars terrestres représentatifs exploités entre 8 500 MHz et 10,5 GHz sont données dans la Recommandation UIT-R M.1796. Le présent Rapport est une contribution qui vient compléter les études demandées au titre de la Question UIT-R 234/8 et de la Résolution 747 (CMR-03).

La Recommandation UIT-R M.1372-1 – Utilisation efficace du spectre radioélectrique par les stations radar du service de radiorepérage, décrit quelques-unes des principales techniques de suppression des brouillages qui sont généralement utilisées dans les radars. L'accent est mis, dans cette Recommandation, sur le traitement postdétecté, même si l'une des techniques qui y est décrite peut être mise en œuvre avant la détection. Les facteurs examinés dans le présent Rapport reprennent certains de ceux figurant dans la Recommandation UIT-R M.1372 et certains de ceux qui les complètent.

1.1 Synthèse des résultats

L'augmentation du taux de fausse alarme sera vraisemblablement la principale dégradation que causeront des impulsions brouilleuses. Ce phénomène est naturellement atténué grâce à certaines caractéristiques communes des radars, notamment l'utilisation d'antennes à faibles lobes latéraux et le caractère asynchrone des impulsions. Le découpage des échos longs, l'utilisation de radars à filtre adapté ou d'autres techniques de raccourcissement des impulsions, entre autres, sont des techniques utiles pour réagir à telle ou telle impulsion. Le couplage le plus préoccupant est le couplage lobes latéraux-faisceau principal.

Une conception prudente des radars permet de limiter de diverses façons les brouillages par impulsions. On peut citer notamment:

- techniques à plusieurs impulsions, notamment le traitement M de N ;
- suppression délibérée de certaines impulsions asynchrones;

- détection des effets des impulsions asynchrones lors de l'examen post-traitement des produits après filtrage Doppler;
- processus non linéaires et variant en fonction du temps, par exemple l'utilisation de limiteurs et le contrôle de sensibilité temporisé;
- corrélation de balayage à balayage.

2 Types de radars fonctionnant dans les différentes bandes

Plusieurs types de radars de radionavigation fonctionnent dans les bandes 9 000-9 200 MHz et 9 300-9 500 MHz. Les radars de radionavigation aéronautique au sol fonctionnent dans la bande 9 000-9 200 MHz; ils comprennent les radars d'approche de précision (PAR, *precision-approach radars*) et les radars de surveillance des mouvements de surface (ASDE, *airport surface detection equipment*). Il s'agit de radars de surveillance à cibles discrètes. La bande 9 300-9 500 MHz est utilisée par un grand nombre de radars de radionavigation maritime dont la grande majorité sont installés à bord de navires ainsi que par les radars d'évitement des perturbations atmosphériques embarqués à bord d'aéronefs. Les systèmes maritimes sont des radars à cibles discrètes, alors que les systèmes embarqués à bord d'aéronefs sont des radars à cibles réparties.

Le service de radiolocalisation bénéficie d'une attribution à titre secondaire dans les bandes 9 000-9 200 MHz et 9 300-9 500 MHz. Les radars météorologiques au sol du service de radiolocalisation fonctionnant dans la bande 9 300-9 500 MHz sont prioritaires par rapport aux autres radars de radiolocalisation (voir le numéro 5.475 du Règlement des radiocommunications). Les radars de radiolocalisation fonctionnent aussi dans les bandes 9 500-9 800 MHz et 9 800 MHz-10,0 GHz, bandes dans lesquelles ils bénéficient d'une attribution à titre primaire.

Les radars à synthèse d'ouverture (SAR) spatioportés des services d'exploration de la Terre par satellite et de recherche spatiale (active) fonctionnent actuellement dans la bande 9,5-9,8 GHz et bénéficient d'une attribution à titre primaire avec égalité des droits. La proposition visant à élargir cette attribution de 200 MHz est dictée par la volonté d'améliorer la résolution de distance de ces radars.

3 Types de conséquences que peuvent avoir les brouillages

La dégradation de la qualité de fonctionnement que subissent les radars de surveillance à cibles discrètes comme les radars PAR, les radars ASDE ou les radars de navigation maritime, en raison des brouillages causés par les radars de radiolocalisation ou des services d'exploration de la Terre par satellite/de recherche spatiale (active) est essentiellement de deux types:

- détections de cibles manquées;
- génération de détections de fausses cibles ou de «fausses alarmes» et poursuites de fausses cibles.

Ces deux phénomènes peuvent être interprétés comme étant respectivement une diminution de la probabilité de détection et une augmentation de la probabilité de fausses alarmes.

Il est concevable que l'exploitation des radars de radiolocalisation ou des services SETS/de recherche spatiale (active) puisse conduire à une certaine désensibilisation de certains radars (détections de cibles manquées, etc.) mais cette désensibilisation devrait être mineure, comme l'ont montré plusieurs programmes de mesures, de sorte qu'on se concentrera sur la génération de fausses cibles.

Les impulsions provenant d'autres radars créent un risque de génération de fausses cibles même lorsque le radar terrestre est doté d'un équipement de taux de fausse alarme constant (CFAR, *constant-false-alarm*) bien conçu. Toutefois, on montre dans la suite du présent Rapport qu'il est possible d'éviter dans une large mesure ces effets si les radars sont bien conçus. Les brouillages peuvent aussi aggraver les erreurs d'estimation de position ou de classification des cibles des radars à cibles discrètes, y compris des radars de poursuite de cibles. Toutefois, ce sont davantage des brouillages continus assimilables à du bruit que les impulsions brouilleuses d'autres radars qui seront à l'origine de telles perturbations.

La dégradation de qualité de fonctionnement que pourraient subir les radars à cibles réparties, y compris les radars d'évitement des perturbations météorologiques ou les radars de surveillance des conditions météorologiques en raison des brouillages causés par les radars de radiolocalisation ou du service SETS se traduit par la présence de fausses alarmes discrètes (par exemple, à un seul pixel) (que les exploitants de radars météorologiques connaissent sous le nom de chatoiement ou speckle) et par l'introduction d'inexactitudes dans les calculs des mesures des phénomènes météorologiques. Pour la dégradation que peuvent subir les radars imageurs à synthèse d'ouverture en raison de brouillages de toutes sortes, la communauté des opérateurs de systèmes scientifiques spatiaux parle d'augmentation de la variance de la puissance de sortie du processeur dans un pixel quelconque¹.

Ces effets contrastent avec les effets de signaux brouilleurs continus assimilables à du bruit sur un radar à cibles discrètes qui contrôle bien son taux de fausse alarme. En l'espèce, la probabilité de fausse alarme tend à rester inchangée mais plus l'intensité du signal brouilleur augmente plus la courbe de la probabilité de détection exprimée en fonction de la distance de la cible ou la section efficace du radar se déplace et glisse vers une distance plus courte ou une section efficace du radar plus élevée. Il s'agit d'un phénomène de désensibilisation généralisée qui touche essentiellement les cibles qui sont petites, éloignées ou mal illuminées en raison de conditions de propagation défavorables (par exemple, propagation par trajets multiples ou phénomènes de conduit défavorables). D'autres fonctions, comme la précision de poursuite, sont elles aussi touchées. Toutefois, le brouillage continu assimilable à du bruit n'entre pas dans le cadre du présent Rapport.

4 Caractéristiques de limitation des brouillages applicables à la plupart des radars

Le couplage de puissance faible ou transitoire, les non-linéarités de certains récepteurs, la variation du gain en fonction du temps, le traitement du signal, le post-traitement et l'espacement des fréquences porteuses sont autant de techniques qui permettent de limiter les brouillages. Dans les interactions de radar à radar, la séparation en fréquence n'est pas toujours nécessaire pour assurer la compatibilité du fonctionnement, étant donné que des découplages importants de puissance et de temps se produisent naturellement ou peuvent être obtenus par une conception adéquate. L'isolation par défaut d'alignement de polarisation se produit dans certaines combinaisons de radars de radiolocalisation spatioportés et de radars de navigation mais on ne peut pas compter sur ce phénomène en général car les radars d'un service donné bénéficiant d'attributions utilisent souvent la polarisation horizontale, verticale et/ou circulaire.

Les mécanismes spécifiques qui contribuent à limiter les brouillages sont définis dans les paragraphes qui suivent. Un grand nombre d'entre eux s'appliquent aux impulsions entre radars de radiolocalisation ou radars de détection spatioportés et radars maritimes, aéroportés ou de contrôle du trafic aérien, tandis que certains s'appliquent essentiellement aux radars relevant de l'une ou l'autre de ces catégories.

¹ Projet de révision de la Recommandation UIT-R RS.1166 – Critères de qualité de fonctionnement et de brouillage applicables aux capteurs spatiaux actifs.

4.1 Isolation par couplage de puissance (effets dus à l'antenne)

Les interactions entre deux radars de types différents supposent presque toujours un défaut de synchronisme entre le balayage des deux faisceaux d'antenne. Cela est presque toujours le cas lorsque l'un des radars est un radar de radiolocalisation et l'autre est un radar de radionavigation car leurs caractéristiques sont différentes étant donné que leurs missions sont différentes. Ce défaut de synchronisme entre le balayage des faisceaux d'antenne est encore plus marqué dans les interactions entre radars de radiolocalisation «tridimensionnels»; en effet, les radars de ce type utilisent des faisceaux ponctuels à exploration en élévation et en azimut, alors que les radars de navigation destinés à être utilisés en surface (radars maritimes et radars de contrôle du trafic aérien) sont habituellement des radars «bidimensionnels» qui balayent uniquement en azimut. Huit des quelque quatorze radars de radiolocalisation décrits dans la Recommandation UIT-R M.1796 utilisent des faisceaux ponctuels qui balayent en élévation et en azimut. Par conséquent, les faisceaux ponctuels de ces radars de radiolocalisation passent, en principe, une grande partie du temps à explorer des régions situées au-dessus de l'horizon, dans lesquelles ils ne peuvent pas être couplés efficacement aux radars de radionavigation basés au sol ou, dans le cas de radars aéroportés, couplés à des angles de dépression variables, de sorte qu'ils illuminent tel ou tel radar de navigation au sol ou aéroporté uniquement occasionnellement. Les radars de radiolocalisation les plus puissants sont les radars au sol pour lesquels les zéros de rayonnement se produisent au niveau de l'horizon, de sorte que le couplage avec les radars de radionavigation au sol est médiocre. En outre, les radars de radiolocalisation ont souvent une fonction d'orientation électronique des faisceaux et ils effectuent des balayages délibérément pseudoaléatoires ou quasi aléatoires car ils s'adaptent à l'environnement prévu. En pareils cas, le lobe principal du radar de radiolocalisation ne revient dans l'axe du radar de navigation qu'à intervalles irréguliers et non pas périodiquement. Il est donc peu probable que les radars de radionavigation à cibles discrètes prennent un brouillage radar faisceau principal-faisceau principal pour une cible valable. Quoi qu'il en soit, en raison de l'étroitesse des faisceaux principaux de tous les radars, la fraction de temps pendant laquelle les faisceaux principaux se trouvent dans le même axe est extrêmement réduite. Par conséquent, les situations qui peuvent normalement poser des problèmes sont les suivantes:

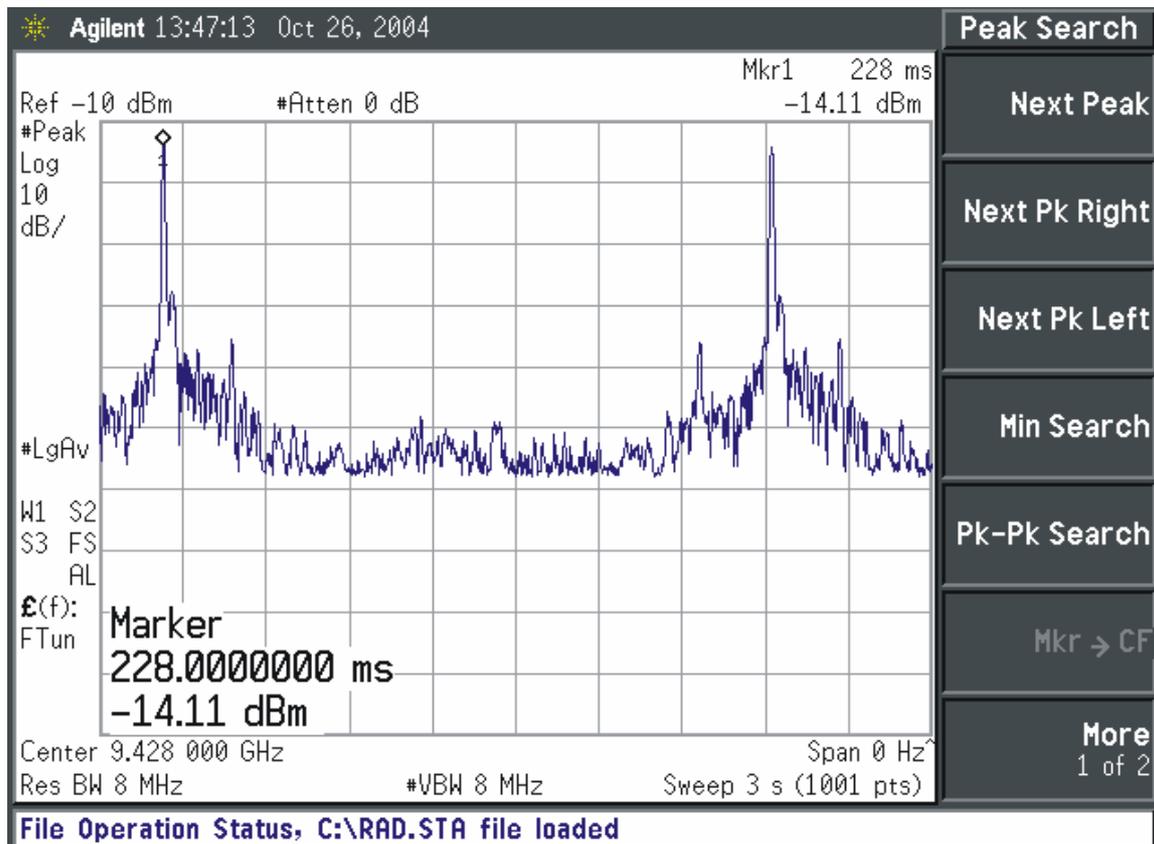
- couplage entre les lobes latéraux d'un radar de radiolocalisation et les lobes latéraux d'un radar de radionavigation;
- couplage entre le faisceau principal d'un radar de radiolocalisation et les lobes latéraux d'un radar de radionavigation; et
- couplage entre les lobes latéraux d'un radar de radiolocalisation et le faisceau principal d'un radar de radionavigation.

4.1.1 Couplage entre lobes latéraux

Dans la très grande majorité des cas, les gains des lobes latéraux, pour les radars de radiolocalisation comme pour les radars de radionavigation, sont inférieurs d'au moins 30 dB aux gains du faisceau principal. En fait, les niveaux médians des lobes latéraux de ce type d'antennes à gain élevé sont proches généralement de -10 dBi de sorte que les facteurs médians de suppression des lobes latéraux sont généralement d'environ 40 dB. Les radars de navigation maritime fonctionnant autour de 10 GHz utilisent normalement des antennes réseau à guide d'ondes à fentes. Ils ont par conséquent une assez bonne suppression des lobes latéraux. En outre, ils utilisent des faisceaux relativement étroits dans le plan azimutal. La Fig. 1 illustre un exemple de diagramme d'antenne dans le plan azimutal mesuré sur un radar de radionavigation maritime disponible sur le marché et fonctionnant dans la bande 9,3-9,5 GHz. Comme le montre la figure, la suppression du lobe latéral dans lequel le gain est le plus élevé est d'environ 25 dB et le niveau médian des lobes latéraux est d'au moins 47 dB inférieur au gain du faisceau principal.

FIGURE 1

Diagramme du gain d'antenne dans le plan azimutal d'un radar de radionavigation maritime fonctionnant dans la bande des 10 GHz



Rap 2076-01

Ce type de performance ne se reflète pas dans la plupart des valeurs du gain dans les lobes latéraux qui ont été publiées, y compris dans celles figurant dans la Recommandation UIT-R M.1796 car les spécifications et les normes ne donnent habituellement que les niveaux des lobes latéraux proches où le gain est le plus élevé, ce qui se comprend facilement. En effet, étant donné qu'une antenne ne peut que concentrer l'énergie et non l'amplifier, on ne peut obtenir un gain dans le faisceau principal qu'en faisant baisser le gain directif dans la plupart des autres directions et en le ramenant au-dessous de la moyenne du gain dans toutes les directions $4\pi(\text{sr})$, qui est nécessairement égale à 0 dBi. Les valeurs des gains du faisceau principal indiquées sont des gains de puissance qui tiennent compte des affaiblissements ohmiques, c'est-à-dire de l'énergie dissipée que l'antenne ne rayonne pas. Ces valeurs sont donc habituellement inférieures de plusieurs dB aux valeurs des gains directifs associés. Le gain de puissance du diagramme d'antenne dans toutes les directions $4\pi(\text{sr})$ est inférieur, dans les mêmes proportions, au gain directif correspondant de sorte que le gain de puissance moyen dans la région des lobes latéraux ne peut en aucun cas être supérieur à -3 dBi environ. Si elle est bien conçue, l'antenne peut concentrer une plus grande quantité de l'énergie rayonnée dans la région du faisceau principal et la suppression de la plupart des lobes latéraux est encore meilleure. Par conséquent, dans la plupart des cas, le couplage entre lobes latéraux est généralement inférieur de 66 à 80 dB au couplage entre faisceaux principaux.

Exception faite des cas où les distances de séparation sont très courtes, les impulsions par couplage des lobes latéraux sont habituellement trop faibles pour générer de fausses alarmes.

Il arrive pourtant que des antennes à ouverture rectangulaire ou quasi rectangulaire concentrent le gain dans leurs lobes latéraux en crêtes situées dans des plans contenant l'axe longitudinal et l'axe transversal de l'ouverture dans lesquels les gains dans les lobes latéraux peuvent en moyenne être supérieurs à -10 dBi mais, dans ces cas, les lobes latéraux dans tous les autres plans sont supprimés et ramenés jusqu'à des valeurs inférieures en moyenne à -10 dBi. En outre, les éventuelles fausses alarmes imputables au couplage entre lobes latéraux seront réparties de façon aléatoire sur une large gamme de valeurs d'azimut de sorte qu'elles n'apparaissent pas généralement comme des cibles.

4.1.2 Couplage faisceau principal-lobes latéraux

Exception faite des balises à répondeurs de faible puissance, les gains des antennes des radars de radiolocalisation exploités dans ces bandes et décrits dans la Recommandation UIT-R M.1796 se situent généralement entre 28 et 42 dBi environ, alors que les gains des radars météorologiques vont jusqu'à 46 dBi. Les radars primaires ont des ouvertures de faisceau étroites dans le plan azimutal, comprises entre $1,5^\circ$ et $5,75^\circ$ à 3 dB, alors que l'ouverture de faisceau des radars météorologiques est de $0,9^\circ$. Si leur couverture en azimut est uniforme sur 360° , comme c'est généralement le cas, le faisceau principal de ces radars ne va pas illuminer d'autres radars pendant plus de $1,5/360 * 100 = 0,42\%$ à $5,75/360 * 100 = 1,6\%$ du temps et ce pourcentage de temps est aussi faible que $0,9/360 * 100 = 0,25\%$ pour les radars météorologiques. Les nombreux radars qui balayent en élévation vont les illuminer à travers le faisceau principal du radar de radiolocalisation encore moins souvent. Les faibles valeurs de ces pourcentages ne garantissent pas en elles-mêmes une compatibilité mais elles sont importantes pour plusieurs raisons:

- les illuminations occasionnelles se produisent à des intervalles qui sont différents de la période de balayage des radars de radionavigation;
- les brouillages sont constitués par des impulsions brouilleuses asynchrones;
- les brouillages éventuels se traduisent généralement par de fausses alarmes.

Par conséquent, les fausses alarmes, y compris les blips (échos lumineux) d'origine météorologique apparents, imputables au faisceau principal d'un radar de radiolocalisation à faisceau rotatif passeront par les azimuts apparents du radar de radionavigation et décriront généralement une courbe en spirale sur l'écran radar panoramique (PPI, *plan-position indicator*). A moins qu'elles ne soient extrêmement denses, on peut faire abstraction de ces fausses alarmes visuellement ou dans des algorithmes de traitement à poursuite sur information discontinue. Les radars de radiolocalisation dotés d'une fonction d'orientation électronique des faisceaux effectuent souvent un balayage pseudoaléatoire étant donné qu'ils ne sont pas tenus de balayer à une vitesse angulaire uniforme; lorsqu'un tel balayage non uniforme se fait dans le même plan que le balayage (habituellement uniforme) d'un radar de radionavigation, les fausses alarmes qui pourraient être imputables au faisceau principal du radar de radiolocalisation seront réparties de façon aléatoire sur un vaste secteur azimutal du radar de radionavigation et il n'y a donc pas de corrélation susceptible de donner lieu à des poursuites de fausses cibles.

4.1.3 Suppression des lobes latéraux

La suppression des lobes latéraux est une fonction facultative qui est parfois intégrée dans certains radars [Skolnik, 1990; Maisel, 1968]. Ce dispositif vient en complément de l'antenne à gain élevé typique des radars dotés d'une antenne auxiliaire à faible gain alimentant un récepteur distinct ayant le même gain que le récepteur principal. Des amplificateurs logarithmiques sont fournis dans les deux canaux de sorte qu'il est aisé de calculer le rapport de puissance des signaux dans les deux canaux à l'aide d'un réseau soustractif. Ces éliminateurs sont utilisés pour éviter toute détection ou autre traitement d'impulsions retour de cible de forte intensité ou d'impulsions brouilleuses via les lobes latéraux de l'antenne du radar. Pour ce faire, on utilise un rapport gain de l'antenne auxiliaire/gain de l'antenne principale approprié ainsi que des valeurs appropriées du seuil de suppression pour le rapport des signaux reçus via les deux antennes. Cette technique ne permet pas

d'assurer une protection contre des brouillages continus étant donné que, si ces brouillages étaient suffisamment forts pour masquer les signaux reçus, ils le feraient la plupart du temps, ce qui conduirait à une dégradation importante de l'efficacité du système. La suppression des lobes latéraux dans l'optique d'une suppression des brouillages ne présente d'intérêt que pour des impulsions brouilleuses à faible cycle. Si cette technique était utilisée dans les radars de navigation, les interactions présentant un intérêt seraient encore plus restreintes et limitées à celles dans lesquelles les impulsions brouilleuses sont reçues via le faisceau principal du radar de navigation.

4.1.4 Couplage lobes latéraux-faisceau principal

Partons du principe qu'un radar de radiolocalisation brouille un radar de radionavigation, créant ainsi un risque de génération de fausses alarmes. Les fausses alarmes les plus perturbantes sont celles que le faisceau de l'antenne du radar de radionavigation détecte, balayage après balayage, approximativement au même azimut et à la même distance, étant donné que ces alarmes risqueraient alors d'être corrélées, par observation manuelle ou automatiquement, et de ce fait d'apparaître comme une cible valable. Pour que cela se produise, il faut nécessairement que les fausses alarmes se produisent régulièrement lorsque le faisceau principal de l'antenne du radar de radionavigation est pointé en direction d'un relèvement donné. L'attention se porte donc sur le cas d'un couplage entre lobes latéraux du radar de radiolocalisation et faisceau principal du radar de radionavigation. Ce phénomène peut être assez marqué par moments étant donné que les radars de radionavigation exploités dans ces bandes ont généralement des gains assez élevés. Les radars de navigation maritime fonctionnant dans cette bande doivent avoir au moins 20 dB de suppression des lobes latéraux en dehors du secteur de 10° centré sur le faisceau principal, ce qui permet d'assurer au moins 20 dB de suppression des brouillages pendant 97% du temps dans n'importe quelle direction. (Dans la pratique, la suppression des lobes latéraux est souvent bien meilleure, ce que montre la Fig. 1.) En soi, la rareté de ce phénomène n'empêchera pas une corrélation des fausses alarmes qui apparaîtront ainsi comme des cibles étant donné que ce phénomène sera généralement restreint à un secteur étroit. Mais du fait des impulsions asynchrones, les éventuelles fausses alarmes apparaîtront à des distances, en principe, aléatoires, variant souvent de façon non monotone d'un balayage à l'autre, ce qui réduit la possibilité qu'elles soient corrélées par un algorithme de poursuite automatique ou par observation visuelle.

4.2 Effets dus à l'unité de traitement

Au niveau de l'unité de traitement des signaux, l'incidence des signaux brouilleurs provenant d'autres radars peut être influencée par des processus qui s'étalent sur une impulsion individuelle (on parle de «fast time» dans la littérature sur les radars SAR) et par des processus qui s'étalent sur plusieurs impulsions (on parle de «slow time» dans la littérature sur les radars SAR). Deux radars de types différents, quels qu'ils soient, en particulier s'ils ont des missions différentes, comme c'est le cas pour les radars de radiolocalisation et de radionavigation, utilisent presque invariablement des intervalles de répétition des impulsions différents, en particulier à un moment donné dans le temps. On a donc la possibilité d'utiliser des techniques puissantes de limitation des brouillages entre radars. Étant donné que cette suppression des brouillages résulte du défaut de synchronisme entre les impulsions générées par le radar brouillé et celles en provenance du radar brouilleur, cela revient à une isolation temporelle et non spatiale ou fréquentielle. Ces techniques comprennent plusieurs méthodes de traitement décrites ci-après.

4.2.1 Impulsions individuelles

4.2.1.1 Découpage des échos longs (FTC, *fast time constant*)

De nombreux radars de navigation maritime ont une fonction FTC ou de différenciation qui permet de réduire l'effet masquant des échos parasites dus aux précipitations. Cette technique FTC est utilisée dans les circuits vidéo ou de postdétection mais elle précède les processus de «corrélation d'impulsion à impulsion» ou d'intégration non cohérente. C'est la raison pour laquelle elle peut en améliorer l'efficacité car elle restreint les impulsions brouilleuses soumises aux processus de corrélation d'impulsion à impulsion aux largeurs étroites et aux faibles cycles. C'est une pratique classique pour assurer, sous une forme ou une autre, un découpage des échos longs dans les radars de navigation maritime fonctionnant autour de 10 GHz ainsi que dans ceux fonctionnant autour de 2 GHz; le FTC conjugué à l'amplificateur logarithmique FI/aux détecteurs utilisés dans ces radars facilite la suppression du fouillis de mer. Il a également un effet positif, celui de raccourcir les impulsions plus longues susceptibles d'être reçues en provenance d'autres radars. En fait, le FTC est une technique étroitement liée à celle de la discrimination de la largeur des impulsions qui est utilisée dans certains radars précisément pour lutter contre les brouillages actifs.

4.2.1.2 Effets de la désintonisation sur le cycle d'utilisation

Que l'on utilise ou non la fonction FTC, les impulsions longues provenant des radars de radiolocalisation qui sont désintonisés par rapport aux radars de radionavigation vont générer des réponses dans les sections FI de ces derniers radars qui sont beaucoup plus étroites que les impulsions émises par les radars de radiolocalisation. Les transitions au début et à la fin de l'impulsion émise vont générer des réponses qui ressemblent à la réponse impulsionnelle du radar de radionavigation, d'une largeur d'environ 1 ms ou moins (en fonction de la largeur des impulsions du radar de navigation). Pendant les phases inactives qui séparent les transitions entre les impulsions émises (temps de montée, temps de descente et certaines transitions entre sous-impulsions) le niveau des réponses sera faible, proche de celui d'une porteuse non modulée désintonisée. Tout comme avec la fonction FTC, cet effet peut faire baisser sensiblement le rapport puissance moyenne/puissance crête des impulsions étrangères et par voie de conséquence augmenter considérablement l'efficacité du processus de «corrélation d'impulsion à impulsion» (à décrire) puisqu'elles diminuent la probabilité de détections de fausses cibles.

4.2.2 Techniques d'intégration à plusieurs impulsions

En général, ces techniques englobent à la fois la «prédétection» ou intégration cohérente, et la «postdétection» ou intégration non cohérente. Dans ce contexte, par «détection» on entend uniquement le processus d'extraction de l'enveloppe du signal et de rejet de la porteuse, et non le processus de comparaison du niveau d'un signal par rapport à un seuil pour déterminer si une cible est présente. L'intégration cohérente est habituellement utilisée pour mettre en œuvre le traitement Doppler et pour maximiser la sensibilité globale du radar. Les radars d'approche de précision peuvent utiliser l'intégration cohérente. Contrairement à l'intégration cohérente, l'intégration non cohérente s'applique uniquement aux amplitudes des signaux reçus, une fois que les informations relatives à leur phase ont été rejetées par un «détecteur d'enveloppe». Qu'ils effectuent ou non une intégration cohérente, la plupart des radars de navigation réalisent, d'une certaine manière, une intégration non cohérente. Il existe de très nombreuses techniques d'intégration postdétection qui sont examinées dans le Manuel sur les radars de Skolnik [Trunk, 1990].

4.2.2.1 Intégration linéaire

Outre la distinction entre intégration cohérente et intégration non cohérente, une distinction importante est faite entre intégration linéaire et intégration non linéaire ou quantifiée. L'intégration linéaire pondère les trains d'impulsions reçues non seulement par le nombre d'impulsions reçues dans les différentes cellules de distance/angulaires/Doppler, mais aussi par l'amplitude de chaque impulsion. Etant donné que l'intégration linéaire conserve la pondération d'amplitude de chaque impulsion, une impulsion de forte intensité contribue proportionnellement plus au résultat de sortie de l'intégrateur qu'une impulsion de faible intensité, ce qui fait que des impulsions brouilleuses isolées peuvent produire des sorties relativement fortes si elles sont suffisamment puissantes. Toutefois, la pondération par le nombre d'impulsions dans une cellule de distance/angulaire/Doppler donnée permet de repérer les impulsions brouilleuses asynchrones, ce qui est particulièrement utile lorsque les impulsions brouilleuses sont relativement faibles.

4.2.2.1.1 Caractéristiques de limitation des brouillages dus à plusieurs impulsions propres aux radars à synthèse d'ouverture

En plus du gain de traitement réalisé sur chaque impulsion, on obtient un gain de traitement supplémentaire dans les radars à synthèse d'ouverture en raison de l'intégration des nombreuses impulsions qui constituent l'ouverture synthétique. La puissance du signal utile est augmentée d'un facteur égal au carré du nombre d'impulsions, N , intégré pendant la durée de l'ouverture synthétique, laquelle est généralement très longue. Pour des impulsions brouilleuses asynchrones, le gain de traitement en azimuth sera toutefois proche de l'unité.

Généralement, le gain de traitement global (en distance et en azimuth) pour des impulsions brouilleuses à faible cycle ne sera de quelques dB, au plus. Par contre, le gain de traitement en azimuth pour le bruit continu (ou des brouillages assimilables à du bruit) sera égal à N .

4.2.2.2 Rejet des impulsions brouilleuses asynchrones par intégration binaire

Contrairement à l'intégration linéaire, l'intégration binaire (non linéaire), également examinée dans la Recommandation UIT-R M.1372, rejette, en quantités variables, les informations relatives à l'amplitude des impulsions; dans le cas extrême, la même pondération est appliquée à chaque impulsion. L'intégration non linéaire tend donc à appliquer la même pondération aux impulsions de retour de cible valables et aux impulsions brouilleuses de forte intensité de sorte qu'elle repère les impulsions brouilleuses asynchrones isolées, même lorsqu'elles sont de très forte intensité. L'intégration cohérente est normalement linéaire alors que l'intégration non cohérente peut être linéaire ou non linéaire.

«L'intégration binaire», «la détection séquentielle» ou «la détection à double seuil» constitue un processus non cohérent et non linéaire. Dans ce cas, la «détection» désigne la sortie d'un comparateur à seuil qui se situe en aval d'un «détecteur d'enveloppe». La détection séquentielle combine les sorties du comparateur à seuil ou «premières détections» dans chaque cellule de distance/angulaire pendant les différents intervalles de répétition des impulsions (PRI, *pulse repetition interval*) ou «balayages». On parle souvent pour ces processus d'intégrateurs ou de corrélateurs même s'il s'agit rarement de véritables intégrateurs ou de véritables corrélateurs au sens mathématique strict du terme. Les différentes détections sont limitées ou ramenées à des quantités binaires simples (zéro ou un). Selon les modèles, les compromis varient: compromis entre détection des cibles et sensibilité de poursuite, compromis entre la précision de l'estimation de l'azimut de la cible (centroïde) et la suppression des détections imputables aux impulsions asynchrones. Dans certains cas, l'opérateur a une certaine marge et peut aménager ces compromis en modifiant les paramètres de fonctionnement. Les caractéristiques de rejet des impulsions asynchrones de ces processus ont été résumées dans la Recommandation UIT-R M.1372.

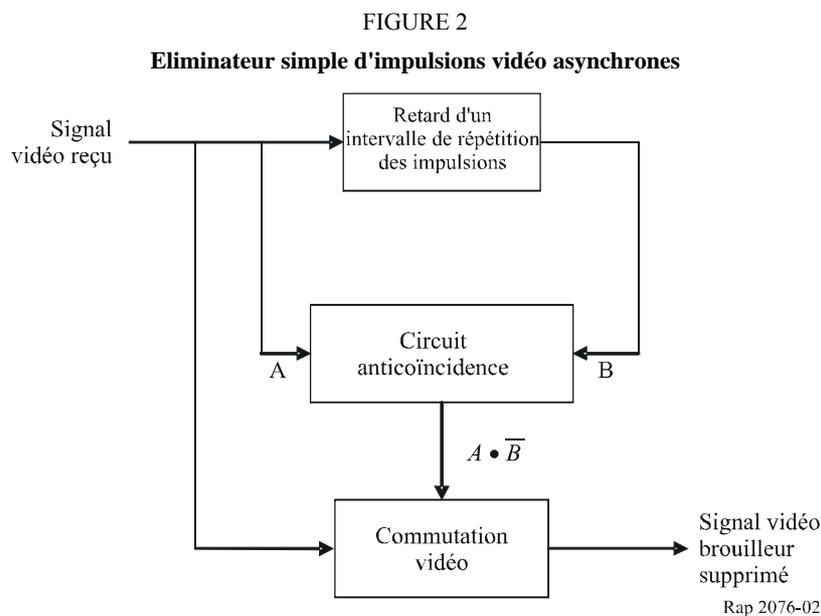
Les intégrateurs/détecteurs à seuil double du type binaire sont particulièrement intéressants car ils arrivent particulièrement bien à repérer les cibles déclarées imputables à des impulsions asynchrones. On peut distinguer deux types d'intégrateurs/détecteurs binaires à double seuil:

- fenêtre glissante, M - de $-N$;
- compteur descendant avec des règles de comptage arbitraires. On parle parfois d'accumulateur, d'intégrateur binaire ou d'intégrateur exponentiel.

Ces deux techniques sont parfois désignées comme étant des processus de Markov. Elles sont examinées dans la Recommandation UIT-R M.1372.

4.2.3 Techniques de suppression et de remplacement des impulsions asynchrones

On sait, depuis de nombreuses décennies, même avant l'arrivée du traitement numérique du signal, comment supprimer des impulsions asynchrones isolées. Les premières versions (de même que des versions plus simples utilisées aujourd'hui) opèrent uniquement sur l'amplitude et n'utilisent pas l'information de phase. La forme la plus simple est essentiellement un intégrateur binaire 2 sur 2, comme indiqué à la Fig. 2. Ce type de circuit est efficace en mode vidéo «normal», c'est-à-dire en l'absence d'annuleurs d'élimination des échos fixes (MTI, *moving target indicator*).



Lorsque le traitement MTI est réalisé, le problème est que chaque impulsion asynchrone isolée génère plusieurs impulsions synchrones, le nombre d'impulsions synchrones générées étant encore plus important lorsque l'on utilise des annuleurs récursifs ou à rétroaction que lorsqu'on utilise uniquement des annuleurs sans rétroaction. Même en l'absence de traitement MTI, les intégrateurs à rétroaction peuvent poser le même problème. Deux solutions s'imposent d'elles-mêmes pour régler ce problème:

- Supprimer les impulsions asynchrones avant que le signal n'atteigne l'annuleur MTI.
- Utiliser uniquement des annuleurs ou des intégrateurs sans rétroaction ou à réponse impulsionnelle finie.

Compte tenu des progrès qui ont été réalisés dans le domaine du traitement numérique du signal, les radars peuvent aujourd'hui repérer que certains échantillons d'impulsions sont des brouillages car ces impulsions sont incohérentes, en amplitude (c'est-à-dire en puissance) ou en angle de phase par rapport aux échantillons d'impulsions reçues qui les précèdent et/ou qui les suivent. Cela peut être

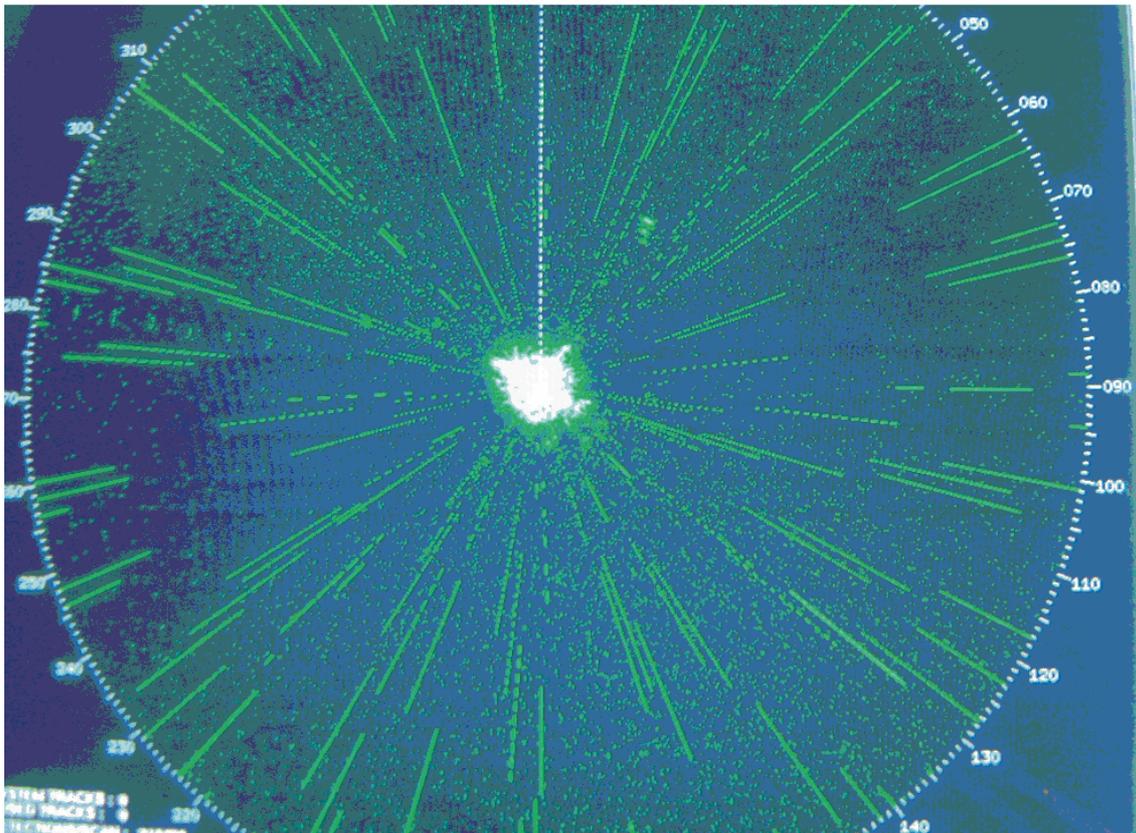
fait avant un traitement cohérent comme le filtrage Doppler ou autocorrélation. Ces processus utilisent une fenêtre glissante d'échantillons successifs appartenant à la même cellule de distance mais provenant d'intervalles différents afin d'obtenir une approximation de ce que devrait être la valeur d'échantillon dans l'intervalle PRI soumis à l'essai. Cette fenêtre pourrait s'étendre sur 8 à 16 PRI ou simplement sur deux PRI, la précision de l'estimation du signal de retour valable étant meilleure lorsque les fenêtres sont larges. L'amplitude ou l'amplitude carrée ($I^2 + Q^2$), ou les valeurs individuelles des échantillons I et Q , pour l'intervalle PRI à l'essai (intervalle PRI «considéré») sont comparées avec les valeurs correspondantes pour la fenêtre de référence. Ces processus peuvent donc opérer sur les formes de prédétection (cohérente) ou de postdétection (non cohérente) des impulsions reçues. Lorsque les différences sont suffisamment importantes, la valeur de l'échantillon considéré est remplacée par une valeur calculée à partir des valeurs de référence. Etant donné qu'il est effectué sur les échantillons «vidéo cohérents» I et Q , le traitement s'applique, quelle que soit la bande de fonctionnement. Des techniques de cette nature sont utilisées pour certains radars militaires ou civils. Ces processus étant nécessairement effectués avant l'intégration à impulsions multiples, les estimations obtenues à partir des échantillons de référence ainsi que l'échantillon testé sont soumis aux variations de bruit lorsqu'ils sont proches du seuil de détectabilité, de sorte que les impulsions brouilleuses de faible intensité sont généralement manquées. Par ailleurs, l'efficacité de suppression des brouillages s'améliore progressivement avec l'augmentation du rapport brouillage/bruit, ce qui fait que la suppression des brouillages de forte intensité devient quasiment systématique. De ce fait, ces processus complètent parfaitement les techniques de suppression des impulsions brouilleuses asynchrones de faible intensité dues à une intégration linéaire à impulsions multiples comme le filtrage Doppler ou une intégration postdétection (non cohérente).

Un processus postdétection analogue à celui qui vient d'être décrit est intégré dans un radar de navigation maritime qui peut fonctionner dans la bande 9,3-9,5 GHz. Pour chaque cellule de distance, une fenêtre glissante s'étendant sur 3 intervalles PRI uniquement est établie. Si l'intensité de l'une des impulsions de la fenêtre est disproportionnée par rapport à celle des deux autres impulsions, on substitue à cette impulsion aberrante une moyenne pondérée des deux autres impulsions. L'exploitant du radar peut activer ou désactiver le processus de rejet des brouillages. Pendant les essais effectués sur ce radar, on a notamment appliqué un train d'impulsions de 10 ms ayant un cycle de 1%, sans mécanisme de porte, pour simuler la modulation de balayage de l'antenne. La Fig. 3 montre l'écran PPI lorsque la fonction de rejet des brouillages était désactivée. Chaque impulsion brouilleuse a produit une longue ligne radiale correspondant à la largeur de l'impulsion brouilleuse de 10 ms.

La Fig. 4 montre l'écran PPI lorsque la fonction de rejet des brouillages était activée. Les échos brouilleurs sur l'écran ont complètement disparu. A part un certain chatoisement disséminé, les seuls blips sur l'écran PPI correspondent à des retours provenant d'échos parasites fixes à proximité du site d'essai et à une ligne de retours de cible simulés délibérément appliquée à un relèvement d'environ 280°.

FIGURE 3

Impulsions brouilleuses apparaissant sur l'écran PPI d'un radar de navigation maritime lorsque la fonction de rejet des brouillages est désactivée



Rap 2076-03

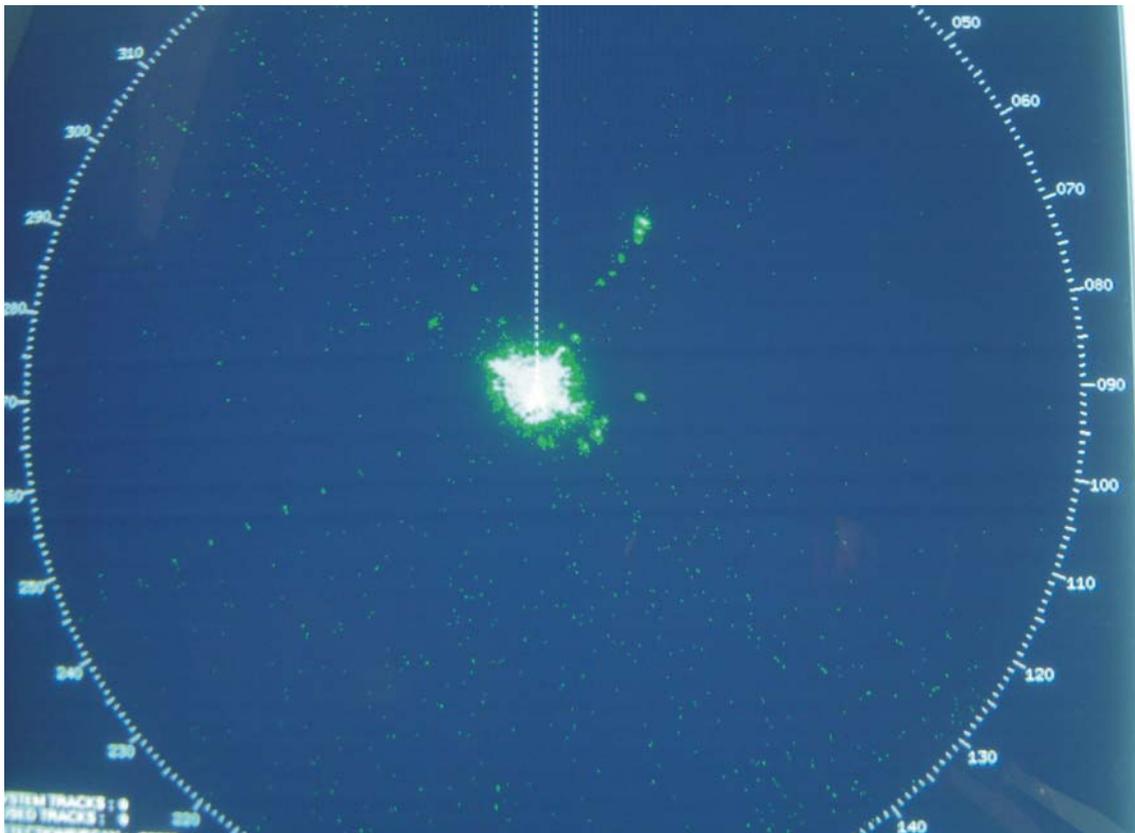
4.2.4 Critères et pratiques en matière de rejet des impulsions asynchrones

Une Résolution de l'OMI indique que les radars de navigation maritime devraient être équipés de moyens leur permettant de réduire de façon adéquate les brouillages causés par d'autres radars (ainsi que les échos non désirés imputables à diverses formes de fouillis) (Section 5.3.2.1 de la Résolution MCS.192(79) de l'OMI). On retrouve le même type de recommandations dans les normes de la CEI à la fois pour les radars SOLAS et les radars non SOLAS (CEI 60936 et CEI 62252). Tous les facteurs susmentionnés contribuent, même de façon secondaire, à la réduction des brouillages de ce type, mais les radars de navigation maritime sont généralement équipés d'un dispositif prévu à cet effet: ils effectuent ce qu'on appelle dans les milieux scientifiques une «corrélation d'impulsion à impulsion», une «corrélation de balayage à balayage» ou une «corrélation de ligne à ligne»². Pour ce faire, on utilise normalement une fenêtre glissante qui s'étend sur N intervalles PRI successifs ou «balayages» et on applique un critère M de N pour la seconde détection.

² Dans la Recommandation UIT-R M.1372, on parle pour la fenêtre glissante 2-de-2 de «discriminateur PRF».

FIGURE 4

Impulsions brouilleuses apparaissant sur l'écran PPI d'un radar de radionavigation lorsque la fonction de rejet des brouillages est activée



Rap 2076-04

Une unité de traitement du signal commercialisée par un grand nom de l'industrie et destinée à être utilisée dans les radars météorologiques au sol, dont certains peuvent fonctionner dans la bande 9,3-9,5 GHz, intègre un processus de prédétection analogue au processus de postdéttection utilisé dans le radar de navigation maritime. Pour chaque cellule de distance, une fenêtre glissante s'étendant sur trois intervalles PRI uniquement est établie. Si certaines conditions concernant la puissance des trois impulsions sont satisfaites, la valeur du vecteur de phase de l'impulsion la plus récente est remplacée par celle de l'impulsion qui la précède immédiatement. Le concepteur ou l'utilisateur du radar a le choix entre plusieurs possibilités pour remplacer l'impulsion mais le principe de base est que le signal brouilleur qui apparaît dans une cellule de distance uniquement une fois sur les trois intervalles PRI peut être remplacé par une valeur raisonnable. Etant donné que le processus ne s'étend que sur trois intervalles PRI, il peut remplacer des impulsions brouilleuses ayant un cycle aussi élevé que $33^{1/3}\%$, mais cela ne sera possible que s'il y a une relation très spéciale entre la PRF des impulsions brouilleuses et celle des impulsions du radar hôte. Au fur et à mesure que le rapport cyclique des impulsions brouilleuses s'affaiblit, la tolérance des relations PRI du radar brouillé devient moins particulière et plus robuste.

Les radars aéroportés d'évitement des perturbations atmosphériques auront eux aussi vraisemblablement un mécanisme de rejet des impulsions asynchrones. Une norme de la Commission technique par radio pour l'aéronautique (RTCA, *Radio Technical Commission for Aeronautics*) fait obligation à ces radars de supprimer les brouillages entre radars. Elle indique que «les transmissions provenant d'un radar de type identique, embarqué à bord d'aéronef en phase

d'approche sur une piste adjacente ou suivant de deux miles nautiques l'aéronef équipé, ne doivent pas causer de fausses alarmes, de détections manquées ou d'autres brouillages observables»³.

4.3 Effets du gain non linéaires et variant en fonction du temps

4.3.1 Limitateurs

Des limiteurs peuvent être utilisés en différents points du récepteur/processeur. Ils peuvent être mis en œuvre de diverses manières et les limitations peuvent être soit délibérées ou fortuites. Les limitations sont fortuites lorsque le récepteur RF et/ou le circuit FI est amené au-delà de la gamme linéaire. Dans les radars qui utilisent le traitement numérique du signal, ce circuit comprend le convertisseur analogique/numérique.

Quelle que soit la mise en œuvre particulière, l'opération de limitation vise clairement à égaliser les amplitudes des impulsions brouilleuses et des impulsions de retour valables lorsque l'un ou l'autre type de ces impulsions ou les deux sont de forte intensité. Les autres processus peuvent alors mieux repérer les impulsions asynchrones qui pourraient provenir des radars de radiolocalisation.

Les limiteurs sont parfois intégrés dans la chaîne récepteur/processeur, l'objectif étant d'éviter des détections en présence de signaux parasites de forte intensité. Cette pratique était autrefois courante lorsqu'on utilisait des circuits de soustraction (éliminateurs d'échos fixes) sans processus CFAR avec établissement d'une moyenne sur la cellule suffisamment efficaces ou sans cartes de fouillis, l'opérateur cherchant à régler le niveau limite afin d'éviter presque toutes les fausses alarmes imputables aux échos parasites résiduels. L'utilisation de ces limiteurs a tendance à diminuer car les convertisseurs analogiques/numériques à dynamique élevée et les procédés de traitement numérique du signal deviennent de plus en plus disponibles.

Comme indiqué ci-dessus, les processus dans lesquels les amplitudes sont conservées ont tendance à maximiser la sensibilité de détection mais ceux dans lesquels les amplitudes sont limitées ou quantifiées subissent généralement un affaiblissement variable de sensibilité mais peuvent toujours repérer les impulsions asynchrones. Lorsqu'un limiteur est utilisé, l'opérateur peut parfois modifier les compromis et préférer se protéger contre les fausses alarmes dues aux brouillages en abaissant le niveau limite; c'est-à-dire, en appliquant une limite encore plus stricte, plutôt que d'optimiser la sensibilité. Cela est particulièrement important lorsqu'on utilise un intégrateur à rétroaction étant donné que les processus à rétroaction génèrent des impulsions synchrones à partir d'impulsions asynchrones isolées et, par conséquent, réagissent généralement mal aux impulsions asynchrones.

La fixation de limites strictes dans une largeur de bande importante (Dickie Fix) avant filtrage sur une largeur de bande plus étroite à filtre adapté est une technique qui a été utilisée dans le passé comme technique CFAR à moindre coût. Cette technique est aussi utile pour atténuer les effets d'impulsions brouilleuses étroites et elle est parfois utilisée comme technique électronique de lutte contre le brouillage par le bruit en modulation de fréquence. Toutefois, c'est une technique risquée si elle n'est pas facultative car des signaux brouilleurs d'intensité forte ou modérément forte, même s'ils sont désynchronisés par rapport au signal utile, peuvent masquer les signaux de faible intensité. L'intégration binaire examinée au § 4.2.2.2 peut être considérée comme une technique de limitation mais elle est mise en œuvre très loin en aval dans la chaîne récepteur/processeur et par conséquent elle ne masque aucun signal de faible intensité.

³ Normes opérationnelles minimales de qualité de fonctionnement applicable à un radar météorologique aéroporté équipé d'une fonction de protection contre le cisaillement du vent, Document N° RTCA/DO-220, 21 septembre 1993, RTCA, Inc.

4.3.2 Amplificateurs logarithmiques

Depuis le milieu des années 70, la quasi-totalité des radars de navigation maritime utilisent des amplificateurs logarithmiques. L'utilisation de tels amplificateurs a les mêmes effets, même s'ils ne sont pas aussi complets, que la fixation de limites strictes, pour ce qui est de la réduction des impulsions individuelles de forte amplitude qui contribuent à la dégradation de la qualité de fonctionnement. Ces amplificateurs permettent sans aucun doute de limiter les risques de saturation du récepteur par des impulsions brouilleuses de forte intensité. En outre, ces amplificateurs sont inévitablement linéaires ou quasi linéaires en présence de signaux de faible intensité mais pour être plus efficaces lorsqu'ils sont utilisés conjointement avec un couplage ac (ou FTC; voir le § 4.2.1.1) pour limiter les échos imputables au fouillis de mer, la transition entre la région linéaire et la région logarithmique intervient environ à 20 dB au-dessous du niveau de bruit moyen [Croney, 1956].

4.3.3 Régulateur de sensibilité temporisé (STC, *sensitivity time control*)

Il s'agit d'un système de gain variable en fonction du temps, d'une forme de désensibilisation délibérée qui varie à l'intérieur de chaque intervalle PRI ou «balayage». Le récepteur ou le processeur est désensibilisé uniquement aux moments correspondant aux échos provenant de cibles à courte distance, étant donné que ces cibles produisent des échos de si forte intensité que le récepteur n'a pas besoin d'être à son niveau le plus élevé de sensibilité pour pouvoir les détecter. Le STC est souvent tel que, à des distances inférieures à une valeur choisie, le seuil de détection des échos radars, rapporté à la borne de l'antenne, varie à une vitesse qui équivaut approximativement à la relation de racine quatrième entre la puissance de l'écho et la distance de la cible pour une section efficace du radar donnée. (En fait, certains récepteurs produisent généralement des signaux de sortie dont l'intensité est proportionnelle au logarithme de l'amplitude ou de la puissance du signal reçu. Le circuit STC, mis en œuvre dans la section vidéo, pondère ces réponses avec une fonction de gain calculée à partir d'une décroissance exponentielle.) Il permet de supprimer les échos dus au fouillis de mer, normalement plus forts dans le cas d'un fouillis à courte distance que dans le cas d'un fouillis à longue distance, et qui, sinon, risqueraient de dépasser la gamme dynamique linéaire du récepteur/processeur. Il permet aussi de supprimer les détections dues à des réflexions d'oiseaux, «angels», à de courtes distances.

Bien sûr le circuit STC permet de réduire le nombre et l'amplitude des détections qui risqueraient d'être générées par des impulsions de radars de radiolocalisation dans la mesure où ces détections apparaîtraient comme de fausses cibles à courte portée. Dans de nombreuses situations, il est plus important d'éliminer les fausses cibles à courte distance que les fausses cibles qui apparaissent à de plus grandes distances car dans le cas de cibles à courte distance il faut agir beaucoup plus rapidement pour éviter les collisions que dans le cas de cibles à longue distance. Les radars de navigation maritime utilisent un circuit STC mis en œuvre dans le circuit vidéo pour supprimer les échos dus au fouillis de mer. Les radars de contrôle du trafic aérien exploités dans cette bande ont aussi la fonction STC.

4.4 Processus CFAR

Les radars de surveillance à cibles discrètes ont besoin d'un mécanisme pour maintenir le taux de détections dans des limites raisonnables. Etant donné que la plupart des détections correspondent habituellement à des échos dus au bruit ou au fouillis et sont donc de fausses alarmes, ces mécanismes sont désignés sous le terme de processus CFAR. Dans sa version la plus simple, cette fonction peut prendre la forme d'un contrôle manuel du gain ou d'un seuil de détection. Habituellement, toutefois, la régulation est automatisée et elle peut se faire assez globalement, c'est-à-dire toucher de vastes secteurs angulaires ou une fraction importante de toutes les distances ou bien on peut fixer un seuil modulable en fonction des conditions locales. La commande automatique de gain qui fait une moyenne sur la totalité ou la plus grande partie des distances, les systèmes Dickie Fix, les circuits STC et/ou l'utilisation conjointe d'un amplificateur logarithmique

et de la fonction FTC ou une différenciation des impulsions sont autant de techniques qui relèvent de la première catégorie. Les techniques CFAR modulables en fonction des conditions locales comprennent l'établissement de cartes du fouillis et, en particulier, les circuits locaux avec établissement d'une moyenne et détermination d'un seuil. Une carte de fouillis est une matrice de niveaux de signaux dont une moyenne est établie sur de nombreux balayages de l'antenne, pour chacune des nombreuses petites cellules de distance/d'azimut. Les circuits locaux avec établissement d'une moyenne et détermination d'un seuil ou circuits CFAR avec établissement d'une moyenne sur la cellule, fournissent un seuil de détection qui s'adapte au niveau du fouillis (et du brouillage) à proximité immédiate de chaque cellule de distance/Doppler/d'azimut qui est testée pour déterminer si des cibles sont présentes. Les processus CFAR locaux avec établissement d'une moyenne et d'un seuil opèrent en construisant une fenêtre glissante en distance (pour chaque canal Doppler, dans le cas du radar Doppler) pendant chaque intervalle PRI. Chaque fenêtre de ce type couvre la cellule de distance pour laquelle une décision de détection doit être prise, plus environ dix à trente cellules de distance adjacentes (habituellement la moitié à courte distance et la moitié à longue distance).

Habituellement, on établit une moyenne des amplitudes des signaux dans ces cellules adjacentes et cette valeur moyenne est multipliée par un facteur de 4 ou de 8 pour déterminer le seuil de détection local. Toutefois, on utilise souvent de nombreuses variations de ce modèle de base. Par exemple, on peut établir séparément une moyenne sur les cellules situées avant la cellule testée et une moyenne sur les cellules situées au-delà de la cellule testée et la plus grande de ces deux moyennes peut être utilisée pour fixer le seuil.

Dans les techniques CFAR avec établissement d'une moyenne sur plusieurs cellules, les cellules qui contenant les signaux de plus forte intensité parmi les cellules de distance adjacentes ne sont habituellement pas prises en compte pour l'établissement de la moyenne, en partie pour éviter que les échos résiduels provenant des diffuseurs de fouillis ponctuels fassent augmenter inutilement le seuil de détection. Toutefois, cette méthode empêche également que des impulsions asynchrones isolées fassent la valeur du seuil et produisent des niveaux de seuil anormalement élevés. Elle ne permet pas de réduire le nombre de fausses cibles dues à des impulsions brouilleuses mais réduit véritablement la tendance des impulsions brouilleuses à désensibiliser le radar brouillé.

4.5 Effets dus au logiciel (post-traitement)

Le groupage en distance/azimut des détections de cibles peut aussi être examiné automatiquement à l'aide de divers algorithmes pour déterminer si un groupe donné de détections représente une cible valable ou non. (Ces processus permettent aussi de repérer aussi la présence de réflexions d'oiseaux «angels».)

Un traitement avec «poursuite sur information discontinue» qui regroupe les rapports relatifs aux cibles provenant de balayages successifs du faisceau de l'antenne et estime la position des cibles et la vitesse des vecteurs, permet aussi de supprimer les fausses cibles. Cette technique de post-traitement est classique dans les radars de contrôle du trafic aérien et de nombreux radars de navigation maritime disposent aussi d'une caractéristique de corrélation de balayage à balayage pour supprimer le fouillis de mer. Cette fonction est généralement associée à l'utilisation d'écrans à balayage récurrent par opposition aux écrans classiques à balayage radial. Le premier avantage des écrans à balayage récurrent était qu'ils sont beaucoup plus lumineux que les écrans à balayage radial car l'antenne balaie plusieurs fois l'écran et non une seule fois. La mise en œuvre de ces écrans suppose que les données relatives aux détections de cibles provenant de toutes les cellules de distance/d'azimut au cours d'au moins un balayage complet de l'antenne soient mises en mémoire avant d'être affichées. Des progrès importants ont été faits récemment en ce qui concerne les circuits de mémoire numériques, ce qui fait que l'utilisation d'écrans à balayage récurrent est aujourd'hui économique. La capacité de mémoire permet également de stocker les données relatives

aux échos radar obtenues après plusieurs balayages, pour toutes les détections balayage après balayage et de comparer les données relatives aux détections de cibles dans chaque cellule de distance-azimut pour un seul balayage de l'antenne et les données de détection dans la même cellule de distance-azimut pour un ou deux balayages antérieurs avant d'afficher ces données. Si les échos sont classés de manière binaire (présent ou absent) ou en termes de niveaux, on peut appliquer des règles pour calculer le niveau de brillance approprié qu'il faut afficher pour chaque pixel de distance-azimut en fonction de la combinaison des niveaux des échos au cours des différents balayages. Cette fonction intensifiera les pixels pour lesquels des échos apparaissent invariablement pendant deux ou plus de deux balayages. Élément plus important pour la compatibilité des radars de localisation et des radars de radionavigation, cette fonction atténuera ou supprimera les pixels dans lesquels un écho apparent apparaît pendant un balayage mais pas pendant le balayage ou les deux balayages suivants. Même dans les radars de navigation qui ne sont pas dotés de cette fonction, l'opérateur peut deviner si les échos apparaissant sur l'écran représentent des retours de cible valables ou non, sur la base d'une observation visuelle de l'uniformité de l'illumination des pixels. Lorsque le brouillage causé par un autre radar est imputable au couplage lobes latéraux-faisceau principal, des détections de cibles peuvent apparaître de façon récurrente au même relèvement. Toutefois, le fait que les impulsions des deux radars soient asynchrones permettra généralement d'éviter que ces détections de cibles se produisent dans la même cellule de distance. Le traitement par balayages multiples permettra donc généralement d'éviter que ces détections de cibles soient affichées.

4.6 Effets dus au spectre

Dans le domaine fréquentiel, la sélectivité du récepteur et la suppression des réponses parasites sont des facteurs qui interviennent dans le rejet des brouillages entre radars tout comme dans toute autre situation de brouillage mutuel. La sélectivité du récepteur pourra permettre de réduire d'au moins 60 dB les composantes spectrales situées suffisamment en dehors dans la bande passante du récepteur brouillé. Tout l'intérêt de la suppression de la bande d'arrêt des radars de radionavigation n'apparaît que si les composantes non désirées des spectres d'émission du radar de radiolocalisation et du radar de détection spatioporté sont supprimées dans des proportions comparables. Dans les bandes 9 000-9 200 et 9 300-9 500 MHz, la plupart des radars de radiolocalisation utiliseront des émetteurs autres que les dispositifs à champs croisés, de sorte que les composantes de bruit des rayonnements non désirés seront relativement faibles.

De même, tous les radars détecteurs spatioportés qu'il est proposé d'exploiter en partie dans les bandes 9 300-9 500 MHz ou 9 800-10 000 MHz utiliseront eux-aussi des dispositifs autres que des émetteurs à champs croisés. Les niveaux des rayonnements non désirés provenant des radars de radiolocalisation et des radars détecteurs spatioportés dans les bandes considérées seront déterminés davantage par des rampes de montée-descente ou de transition, avec modulation angulaire incidente, que par le bruit de dispositif. L'efficacité spectrale de plusieurs dispositifs de sortie d'émetteurs radars est décrite dans la Recommandation UIT-R M.1314 – Réduction des rayonnements non désirés émis par les systèmes radar fonctionnant au-delà de 400 MHz.

En outre, l'intermodulation de deux signaux est généralement moins importante dans le cas d'interactions entre radars que dans le cas de brouillages entre systèmes de communication car les transmissions radar ont habituellement des cycles faibles par comparaison. Les conjonctions temporelles entre impulsions provenant de deux radars sont généralement rares car il est peu probable que l'impulsion émise par un radar arrive au niveau du radar brouillé simultanément avec une impulsion provenant de l'autre radar.

Certains radars de radiolocalisation émettent des impulsions longues avec un cycle qui est faible par rapport à celui des systèmes de radiocommunication mais élevé par rapport à celui des radars de radionavigation. Toutefois, les impulsions les plus longues sont habituellement modulées avec des formes d'ondes avec balayage de fréquence, chirp, afin d'assurer la compression des impulsions dans le récepteur du radar de radiolocalisation et le balayage de fréquence dans ces impulsions longues est habituellement beaucoup plus large que dans les bandes passantes des radars de radionavigation. Même si le balayage de fréquence s'étendait sur la totalité de la bande passante du radar de radionavigation, il demeurerait un rejet en fonction de la fréquence importante tandis que la fréquence instantanée est balayée en des points inférieurs et supérieurs à la bande passante. Cet effet a été confirmé de façon empirique sur un radar de navigation maritime fonctionnant dans la bande 9,3-9,5 GHz, et les résultats font l'objet d'un rapport distinct. Cette dilution de l'énergie syntonisée peut être interprétée de diverses manières. Manifestement, la densité spectrale de puissance moyenne est affaiblie par l'étalement de fréquence. Une interprétation plus utile de cet effet de dilution est de reconnaître que la largeur d'impulsion effective, c'est-à-dire la largeur des impulsions provenant de la section FI du radar de radionavigation est souvent beaucoup plus petite que la largeur des impulsions émises par le radar de radiolocalisation. Cette réduction de la largeur des impulsions peut être assurée par une bonne conception des radars de radiolocalisation et des radars des services d'exploration spatiale/de recherche spatiale. De cette façon, le découpage fréquentiel effectué par le récepteur du système de radionavigation se traduit par un découpage temporel. Si la vitesse du balayage de fréquence est supérieure au carré de la largeur de la bande passante FI du radar brouillé, la largeur d'impulsion effective (à la sortie de l'amplificateur FI) est fixée par la durée de sa réponse impulsionnelle mais l'amplitude de l'impulsion reçue est affaiblie par rapport à l'amplitude de l'impulsion captée par l'antenne du radar brouillé. En pareil cas, la puissance de crête devient inversement proportionnelle à la vitesse de balayage. Cela bien sûr contribue à la réduction des brouillages.

La diversité de fréquence et l'agilité en fréquence sont utilisées par de nombreux radars, en particulier les radars de radionavigation aéronautique. L'agilité en fréquence permet de diminuer le risque que les émissions provenant d'un radar chevauchent systématiquement la bande passante d'acceptation de l'autre radar.

5 Conclusions

Généralement la compatibilité entre un radar de radiolocalisation et un radar de radionavigation est facilitée avant tout par le balayage de leurs faisceaux d'antenne de sorte que l'énergie brouilleuse est rarement reçue par couplage faisceau principal-lobes latéraux et encore plus rarement par couplage faisceau principal-faisceau principal.

Élément plus important, le fait que le radar de radiolocalisation et le radar de radionavigation aient des vitesses de balayage différentes évite des brouillages récurrents via le faisceau principal du radar source au même relèvement du radar brouilleur, ce qui limite le risque de corrélation de balayage à balayage entre d'éventuelles fausses alarmes brouilleuses. Une réduction supplémentaire est permise par les différences entre les formes d'onde des deux types de radars et le rejet associé des impulsions brouilleuses grâce au filtre du récepteur et au traitement du signal. Dans certains radars ce traitement comprend un traitement cohérent (prédétection) ainsi qu'un traitement non cohérent (postdétection). Dans d'autres radars de navigation, le traitement cohérent est largement ou totalement absent mais le traitement non cohérent est potentiellement tout à fait efficace pour améliorer la compatibilité entre radars de radiolocalisation et radars de radionavigation.

Un petit nombre de ces mécanismes s'appliquent éventuellement aux brouillages causés aux radars de tous types par des émetteurs sans fonction de balayage, à ondes continues utilisant des formes d'onde semblables à du bruit.

Références

CRONEY, J. [avril 1956] Clutter on radar displays. *Wireless Engineer*, Vol. 33, p. 83-96.

MAISEL, L. [mars 1968] Performance of sidelobe blanking systems. *IEEE Trans. on Aerospace and Electron. Systems*, Vol. AES-4, 2, p. 174-180.

SKOLNIK, M.I. (Ed.) [1990] *Radar Handbook*, McGraw-Hill.

TRUNK, G.V. [1990] *Automatic detection, tracking and sensor integration*. Chapitre 8 du M.I/ Skolnik (Ed.) *Radar Handbook*, 2ème édition, McGraw-Hill.
