



Traitement, Synthèse, Technologie et Applications

BIARRITZ — Mai 1984 —

IMAGERIE RADAR À OUVERTURE SYNTHÉTIQUE : APPLICATIONS AÉROPORTÉES ET SPATIALES

SYNTHETIC APERTURE IMAGING RADAR : AIRBORNE AND SPACEBORNE APPLICATIONS

PIERRE ANTHOUARD

THOMSON-CSF AVS 178 BOULEVARD GABRIEL PÉRI 92240 MALAKOFF - FRANCE

RESUME

Les radars à ouverture synthétique, aéroportés ou à bord de satellite sont des instruments capables de générer des images du sol de haute résolution, de jour comme de nuit et de façon pratiquement indépendante des conditions météorologiques. Les applications en sont multiples aussi bien dans le domaine militaire : reconnaissance, que dans le domaine civil : cartographie, télédétection où le radar apporte des informations dans une nouvelle région du spectre électromagnétique.

Après un bref rappel de l'histoire de ce type de radar, en particulier en France, l'exposé reprend la théorie et les principes du radar à ouverture (ou antenne) synthétique, en examinant les contraintes liées aux deux types de porteurs (avion ou satellite).

Les paramètres qui définissent la qualité de l'image (résolution, contraste, conformité) sont ensuite étudiés.

Les principaux sous-ensembles d'un radar à antenne synthétique sont décrits en mettant l'accent sur le système de traitement, en particulier les traitements optiques et numériques. Cette description s'appuie sur les connaissances acquises avec les radars aéroportés développés en France.

Des exemples de matériels sont cités et diverses applications de l'imagerie radar sont ensuite examinées. Enfin les développements futurs des radars à antenne synthétique sont évoqués.

SUMMARY

Synthetic aperture radars (SAR), either airborne or spaceborne, are systems capable of obtaining high resolution ground images, by day or night, independent of weather conditions.

Their applications are very broad, either military : reconnaissance or civilian : mapping, remote sensing where the radar gives information in a new region of the electromagnetic spectrum.

Following a brief historical account, particularly in France, the paper goes on the theory and main concepts of the SAR, examining the constraints concerning the two carriers (aircraft and spacecraft).

The different parameters defining the image quality are then examined, ie : resolution, contrast, conformity.

The main SAR subsystems are then described giving details on different processing techniques, particularly optical and digital processing. This is based on airborne radar development experience acquired in France.

Examples of existing equipments are listed and many radar image applications are considered.

Finally, future developments in the SAR field are investigated.



1 - INTRODUCTION

Les radars à ouverture synthétique, aéroportés ou à bord de satellite sont des instruments capables de générer des images du sol de haute résolution, de jour comme de nuit et de façon pratiquement indépendante des conditions météorologiques. Les applications en sont multiples aussi bien dans le domaine militaire : reconnaissance, que dans le domaine civil : cartographie, télédétection, où le radar apporte des informations dans une nouvelle région du spectre électromagnétique.

Les premiers travaux sur les techniques d'antenne synthétique ont été menés au début des années 50 aux Etats-Unis. Les principes ont été établis en Juin 1951 par Carl Wiley et les premiers résultats expérimentaux obtenus avec une maquette aéroportée datent de Juillet 1953. En 1958 le premier programme de radar haute résolution à antenne synthétique était lancé pour des besoins militaires (surveillance du champ de bataille) [1], [2].

En France, les premiers travaux dans ce domaine démarèrent dans les années 60 à la CSF, également sous contrats militaires. Ils permettaient dès 1964 d'avoir des images radar de quelques dizaines de mètres de résolution. Un facteur dix dans la résolution était ensuite gagné avec le radar à antenne latérale synthétique RAFAL sorti d'usine en 1969 et qui utilisait un traitement optique [3]. Le radar RAPHAEL, dérivé du RAFAL devait permettre d'expérimenter en 1978 un système de traitement numérique temps réel. Ces divers programmes ont permis d'acquérir en France une bonne maîtrise des techniques d'antenne synthétique appliquées aux radars aéroportés. Les excellentes images obtenues dès le début des années 70 sont peu connues à cause de leur caractère militaire.

Dès 1973, des études théoriques menées à la THOMSON-CSF avaient démontré la faisabilité d'un radar à antenne latérale synthétique embarqué sur satellite.

Dans ce domaine, le satellite Américain SEASAT-A, lancé avec succès en 1978, était équipé d'un tel radar, développé par le Jet Propulsion Laboratory (JPL). La bonne qualité des images fournies a contribué à mieux faire connaître ce type de senseur et ses immenses possibilités. De nombreux établissements ou laboratoires notamment aux Etats-Unis, au Canada, en Angleterre, en Allemagne et en France ont utilisé les données brutes du radar de SEASAT pour se familiariser avec le traitement d'antenne synthétique et tester différents algorithmes. Un second radar, SIR-A, développé aussi par le JPL a été expérimenté avec succès au cours du deuxième vol de la navette spatiale Columbia en Novembre 1981.

Cet exposé n'a pas la prétention de passer en revue tous les radars à antenne synthétique embarqués sur avion ou sur satellite. Il se propose seulement d'en rappeler la théorie et les principes (§ 2), de définir les paramètres de qualité d'image (§ 3), de décrire certaines caractéristiques ou particularités de ces radars (§ 4) et des traitements associés (§ 5) en s'appuyant essentiellement, pour les matériels aéroportés, sur les connaissances acquises avec les radars développés en France, et en décrivant certains exemples (§ 6). Diverses applications de l'imagerie radar sont ensuite examinées (§ 7) et, en conclusion, les développements futurs des radars à antenne synthétique sont évoqués.

2 - THEORIE ET PRINCIPES DU RADAR A ANTENNE SYNTHETIQUE

Les deux dimensions d'une image radar du sol sont définies respectivement par la direction de propagation des ondes et par le balayage de l'antenne.

Ce balayage est obtenu soit par une rotation en gisement de l'antenne pour les radars classiques, soit ou aéroportés, soit pour les radars à antenne latérale, par déplacement du porteur (avion ou satellite).

La qualité des images est liée, en particulier, à la résolution spatiale de l'instrument. Cette résolution correspond à la dimension d'un objet (ou écho) ponctuel vu par le radar. De façon classique, cette résolution se décompose de la façon suivante (voir figure 1) :

- résolution "en distance radar", c'est-à-dire dimension de l'écho suivant la direction de visée,
- résolution "en azimut", c'est-à-dire dimension de l'écho dans une direction orthogonale à la précédente.

Pour un radar classique, la résolution en azimut est une résolution angulaire fournie par la largeur du diagramme d'antenne dans le plan horizontal, laquelle est proportionnelle à la longueur d'onde λ utilisée dans le radar et inversement proportionnelle à la longueur L de l'antenne. La résolution de l'image radar en azimut, pour un point situé à une distance D vaut :

$$r_a = D \frac{\lambda}{L} \quad (1)$$

Par exemple, pour un radar fonctionnant à 10 GHz ($\lambda = 3$ cm) et utilisant une antenne de 1 mètre de long, la résolution en azimut à 10 km est de 300 mètres.

La résolution en distance radar est directement liée à la durée d'impulsion τ utilisée par le radar, celle-ci étant inversement proportionnelle à la bande de fréquence émise. Si la direction d'observation d'une zone de sol, par rapport à l'horizontale vaut α , la résolution en distance radar r_d vaut alors :

$$r_d = \frac{c\tau}{2} \cdot \frac{1}{\cos \alpha} \quad (2)$$

où c est la vitesse de la lumière

Par exemple, pour une durée d'impulsion de 100 ns (bande de fréquence émise : 10 MHz) et $\alpha \approx 0$ (cas général des radars aéroportés) la résolution en distance est de 15 mètres.

S'il est relativement facile d'obtenir une bonne résolution en distance radar, par contre la relation (1) montre que l'obtention d'une bonne résolution en azimut, à grande distance, suppose avec un radar classique :

- de monter en fréquence (diminution de λ) ; les phénomènes de propagation interdisent de grandes portées et les difficultés de réalisation technologique croissent,
- d'utiliser une antenne de grande dimension (plusieurs mètres, voire plusieurs dizaines de mètres), ce qui conduit assez rapidement à quelque chose d'irréaliste pour un matériel embarqué.

L'amélioration de la résolution en azimut, nécessaire pour avoir une image radar de qualité, est obtenue par la mise en oeuvre de techniques d'antenne synthétique. Ces techniques supposent le déplacement du radar suivant une trajectoire parfaitement connue et ne sont donc applicables qu'à des radars embarqués (sur avion ou sur satellite).

L'appellation "antenne synthétique" signifie que le déplacement du radar et le traitement des signaux reçus pendant ce déplacement sont équivalents à une antenne "fictive" de très grande dimension (plusieurs centaines de mètres).

Cette appellation s'applique à plusieurs catégories de radars suivant que l'antenne est ou non en balayage gisement.

IMAGERIE RADAR À OUVERTURE SYNTHÉTIQUE : APPLICATIONS AÉROPORTÉES ET SPATIALES
 SYNTHETIC APERTURE IMAGING RADAR : AIRBORNE AND SPACEBORNE APPLICATIONS
 PIERRE ANTHOUARD

2.1. Résolution en azimut du radar à antenne synthétique

Les performances en résolution d'un radar à antenne synthétique peuvent être évaluées à partir de l'analyse de la fréquence Doppler des signaux reçus. Cette mesure de la différence de fréquence entre le signal émis et le signal reçu suppose l'utilisation d'un émetteur-récepteur cohérent.

Supposons un porteur se déplaçant à une vitesse V et un écho ponctuel situé par rapport à ce porteur dans une direction \vec{u} (voir figure 2). La fréquence Doppler de cet écho vaut :

$$f_d = \frac{2}{\lambda} \vec{V} \cdot \vec{u} \quad (3)$$

En supposant l'écho situé dans un plan horizontal contenant le vecteur vitesse et dans une direction d'observation G par rapport à ce vecteur vitesse, il vient :

$$f_d = \frac{2V}{\lambda} \cos G \quad (4)$$

Deux échos, situés à la même distance dans la direction G et séparés angulairement de ΔG possèdent une différence de fréquence Doppler

$$\Delta f_d = \frac{2V}{\lambda} \sin G \cdot \Delta G \quad (5)$$

Si la durée d'observation de ces échos est T , la résolution angulaire ΔG du radar est donnée directement par la résolution en fréquence au mieux égale à $1/T$.

a) Cas du radar à antenne en balayage

Dans le cas où l'antenne du radar est en balayage et possède une ouverture angulaire θg ($\theta g = \lambda/L$), la résolution en azimut vaut :

$$\Delta G = \frac{L \Omega}{2V \sin G} \quad (6)$$

Le temps d'observation restant le même quelle que soit la distance, la résolution en azimut reste une résolution angulaire, mais sensiblement améliorée par rapport à la résolution naturelle de l'antenne. Le taux d'amélioration, ou taux d'affinage est classiquement de l'ordre de 20 pour des angles d'observation de 30°.

b) Cas du radar à antenne latérale

Dans le cas où l'antenne est fixe par rapport au porteur et regarde, par exemple, dans une direction perpendiculaire à son vecteur vitesse, le temps d'observation vaut :

$$T = \frac{D \cdot \theta g}{V} \quad (7)$$

Il est d'autant plus important que la distance d'observation est grande. La résolution angulaire ΔG vaut :

$$\Delta G = \frac{\lambda}{2 \theta g \cdot D} \quad (8)$$

La résolution en azimut r_a qui est égale à $D \cdot \Delta G$ s'écrit :

$$r_a = \frac{\lambda}{2 \theta g} = \frac{L}{2} \quad (9)$$

Pour un radar à antenne synthétique à vision latérale, la résolution théorique suivant la direction parallèle à la route du porteur est indépendante de la distance d'observation et vaut la moitié de la longueur de l'antenne réelle. Cette propriété fait que ce radar est bien adapté pour obtenir des images de très haute résolution à grande distance. Uniquement les propriétés et caractéristiques de ce type de radar sont développées dans la suite.

2.2. Géométrie du système

Dans le cas du radar à vision latérale, la zone de terrain visualisée est parallèle à la trajectoire suivie par le porteur (voir figure 3). A un instant donné, l'antenne du radar éclaire une portion de terrain (zone hachurée sur la figure) dont les dimensions respectives sont liées à l'ouverture en site et en gisement de l'antenne ainsi qu'à la distance et à l'angle d'observation. L'ouverture en site est suffisante pour éclairer convenablement la largeur de la zone à visualiser (ou fauchée). L'ouverture en gisement définit, compte tenu de la vitesse du porteur, un temps d'observation des échos.

L'image de la zone de sol est obtenue :

- dans la direction de visée (en "distance radar") par différenciation des échos en fonction de leur retard par rapport à l'instant d'émission du radar. La bande visualisée sera décomposée en "cases de distance" dont la dimension (ou largeur) dépend de la résolution en distance,
- dans la direction parallèle à la trajectoire du porteur, par différenciation des échos en fonction de leur fréquence Doppler, ceci pour chacune des cases de distance.

L'image résultante est donc composée de cellules élémentaires de dimensions respectivement égales à la résolution en distance et à la résolution en azimut, chaque cellule ayant une brillance fonction de l'énergie réémise par la cellule correspondante observée sur le sol. Cette énergie est proportionnelle au coefficient de rétrodiffusion σ_0 du sol dans le cas d'un sol homogène, ou à la surface équivalente radar de l'écho observé dans le cas où la cellule observée contient un écho ponctuel (ou point brillant) prédominant.

Les caractéristiques des signaux reçus peuvent être définies en raisonnant sur un écho ponctuel, en supposant que l'ensemble radar et traitement associé est linéaire.

Dans l'hypothèse où la trajectoire du porteur est rectiligne et que la vitesse est constante, la loi de phase du signal reçu d'un écho ponctuel est une loi de phase quadratique ; elle est liée à la variation de distance entre l'antenne du radar et le point considéré.

Elle s'écrit : $\phi = \phi_0 + K t^2$ (10)

où t exprime le temps, et $t = 0$ quand le point est dans l'axe de l'antenne (distance minimale)

avec $\phi_0 = \frac{4 \pi D}{\lambda}$ (11)

$K = \frac{2 \pi V^2}{\lambda D}$ (12)



Ceci correspond à une loi de fréquence Doppler linéaire en fonction du temps (voir figure 4). Sa durée est limitée en première approximation à la durée T d'éclairement du point dans le lobe à 3 dB de l'antenne. La fréquence Doppler instantanée de l'écho considéré s'écrit :

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{dt} = \frac{2V^2 t}{\lambda D} \quad (13)$$

Le signal reçu d'un point est caractérisé par sa durée T définie par (7), et sa bande de fréquence B telle que :

$$B = \frac{2V}{\lambda} \theta_g = \frac{2V}{L} \quad (14)$$

L'amplitude de ce signal est pondérée par le diagramme en gisement de l'antenne, aller et retour.

Les caractéristiques définies ci-dessus sont valables pour une trajectoire rectiligne. Dans d'autres hypothèses, en particulier pour la trajectoire d'un satellite, les valeurs à prendre en compte sont légèrement différentes, les principes restent les mêmes.

2.3. Traitement d'antenne synthétique

Les signaux reçus par un radar latéral à antenne synthétique sont caractérisés par leur durée T et une modulation linéaire de fréquence sur une largeur de bande B . Le traitement d'antenne synthétique consiste à comprimer ce signal ce qui peut être réalisé de deux façons : dans le domaine temporel (corrélation) ou dans le domaine fréquentiel (filtrage adapté), les deux méthodes conduisant naturellement au même résultat.

Dans le domaine temporel, le traitement adapté consiste à effectuer pour chaque case de distance une corrélation entre le signal reçu et un signal de référence ou réplique dont les caractéristiques d'amplitude et de phase sont celles du signal issu d'un écho ponctuel idéal.

Le résultat du traitement, pour un écho ponctuel isolé est la fonction d'autocorrélation d'un signal modulé linéairement en fréquence. Cette fonction d'autocorrélation a une forme proche de la fonction $\sin x/x$, au voisinage du lobe principal. La largeur à 3 dB de ce lobe principal, qui définit la résolution en azimut exprimée en unité de distance vaut $L/2$: autre façon de retrouver le résultat (9).

Si, dans l'opération de corrélation, la fonction de référence est limitée en durée et donc en largeur de bande, le signal de sortie sera élargi dans la même proportion. Cette propriété permet avec un radar à antenne synthétique de choisir la résolution en azimut à condition qu'elle reste supérieure à $L/2$.

2.4. Ambiguïtés distance et azimut

Le radar fonctionne en émettant des impulsions à intervalles réguliers et par conséquent effectue des mesures de distance et de fréquence Doppler avec des ambiguïtés.

Ces ambiguïtés se traduisent pour un radar d'imagerie par des confusions entre la zone observée et les zones voisines aussi bien en distance qu'en azimut (voir figure 5). C'est le diagramme d'antenne qui sépare la zone utile des zones ambiguës voisines. La fréquence de répétition f_r (ou fréquence de récurrence) des impulsions détermine à la fois la profondeur de la zone observable et la position des ambiguïtés en azimut le long de la route du porteur.

Un compromis doit être fait dans le choix de ce paramètre qui doit être supérieur à la bande Doppler du signal $B = 2V/L$ pour représenter correctement toutes les fréquences.

Le taux d'ambiguïté, défini sur une surface homogène, est le rapport entre la puissance reçue dans la zone utile et la somme des puissances reçues des différentes zones ambiguës par les lobes secondaires et diffus de l'antenne. Un taux d'ambiguïté acceptable doit être supérieur à 20 dB. Ce paramètre mesure la qualité de l'antenne.

2.5. Sources d'erreurs

Par rapport à la théorie, les signaux réels sont entachés d'erreurs qui se traduisent par des perturbations sur les fonctions de corrélation en azimut et en distance. Ces erreurs dépendent essentiellement de la géométrie et de l'instrument. D'autres erreurs sont liées aux phénomènes de propagation (en particulier inhomogénéités de l'ionosphère pour les radars montés sur satellite).

a) Erreurs dues à la géométrie

La détermination du signal de référence utilisé dans le traitement en azimut suppose qu'est parfaitement connue la géométrie du système. Le signal de référence est caractérisé essentiellement par la valeur de la fréquence Doppler moyenne (nulle lorsque l'antenne est pointée dans une direction perpendiculaire à la trace du porteur sur le sol), par la loi fréquence - temps, ainsi que par sa durée. La loi de variation fréquence - temps est, avec une bonne approximation une loi linéaire. La pente fréquence - temps dépend de la distance minimale d'observation et de la vitesse du porteur.

Des mouvements parasites transverses de l'antenne du radar autour de la trajectoire de référence du porteur se traduisent par des dégradations de la fonction de corrélation en azimut (perte de résolution, remontée des lobes secondaires et diffus), dans la mesure où ils ne sont pas compensés. La nature de ces dégradations dépend de l'amplitude et de la fréquence des mouvements parasites (voir figure 6). Ces derniers sont d'autant plus gênants que la longueur d'onde utilisée dans le radar est petite. En effet, à un déplacement transverse d'une valeur de $\lambda/2$ correspond une rotation de phase parasite de 2π . Pour un radar fonctionnant en bande X, il est nécessaire de contrôler les déplacements de l'antenne du radar à quelques millimètres près !

b) Erreurs dues à l'instrument

Par rapport aux caractéristiques idéales de linéarité, les circuits du radar comportent des erreurs qui se traduisent par des perturbations des fonctions de corrélation en distance et en azimut. En distance radar le type d'émission-réception généralement utilisé est une émission-réception à compression d'impulsion qui utilise de la modulation linéaire de fréquence et délivre une fonction de corrélation du même type que la fonction de corrélation en azimut.

Les erreurs proviennent essentiellement de l'amplificateur de puissance hyperfréquence, de l'oscillateur pilote de référence qui doit être très stable, des dispositifs de génération et de compression du signal émis et reçu (lignes dispersives) ainsi que des quantifications et approximations du traitement.

2.6. Contraintes liées au porteur

Les radars à antenne synthétique peuvent être embarqués soit à bord d'avion, soit à bord de satellite, avec dans chaque cas des contraintes particulières.

a) Radars à antenne synthétique sur avion

Ces radars se caractérisent généralement par des largeurs de fauchée de quelques kilomètres à quelques dizaines de kilomètres situées à droite et/ou à gauche du porteur. Les distances maximales d'observation sont de l'ordre de 100 à 200 km et dépendent en particulier de l'altitude de vol de l'avion. Les résolutions varient entre quelques mètres et la dizaine de mètres. Les angles d'observation sont faibles par rapport à l'horizontale ($< 30^\circ$).

La principale difficulté, à bord d'avion, est de compenser les mouvements parasites de l'antenne, dus aux mouvements du porteur et aux vibrations. La correction de ces mouvements parasites fait en général intervenir plusieurs sources de mesures (accéléromètres, centrale à inertie, ...). Le choix de ces sources de mesure ainsi que leur traitement sont des sujets jalousement protégés par les constructeurs ; ils interviennent pour une grande part dans la qualité des images radar.

b) Radars à antenne synthétique sur satellite

Les radars à antenne synthétique sur satellite, d'apparition plus récente, sont soumis à des contraintes sensiblement différentes de celles des radars aéroportés (grande distance, grande vitesse, rotation de la terre).

La distance d'observation est grande compte tenu du choix de l'orbite suffisamment haute (> 600 km) pour minimiser le freinage dû à l'atmosphère.

La position de l'orbite définit la vitesse du satellite qui se situe aux environs de 7000 m/s (au moins dix fois plus élevée que sur avion).

La rotation de la terre introduit, en fonction de la position du satellite sur son orbite, une vitesse de rapprochement ou d'éloignement du sol. Il s'ensuit une translation des fréquences Doppler et une variation de la distance des échos (migration) pendant le temps d'éclairage, qu'il faut mesurer et compenser dans le traitement.

Cette géométrie particulière a des conséquences sur le dimensionnement de plusieurs paramètres :

- Les angles de visée sont proches de la verticale (entre 20° et 40°) pour minimiser les distances d'observation. En conséquence, il faudra utiliser une impulsion deux à trois fois plus étroite, à résolution en distance égale, que pour un radar fonctionnant en incidence rasante,
- la longueur L de l'antenne sera de l'ordre de la dizaine de mètre pour limiter la bande de fréquence Doppler ($2V/L$) et pouvoir choisir une fréquence de répétition suffisamment basse afin d'observer une largeur de fauchée suffisante (de 50 à 100 km),
- le diagramme en site de l'antenne doit être très sélectif afin d'atténuer les ambiguïtés de distance,
- la ligne d'altitude qui correspond au signal renvoyé par le sol situé à la verticale du satellite doit être rejetée en dehors de la période utile de réception. Ceci impose une contrainte supplémentaire sur le choix de la fréquence de répétition,

- les migrations en distance doivent être corrigées dans le traitement. Celles-ci comportent une partie linéaire déjà mentionnée et une partie quadratique (génératrice de la loi de phase quadratique). La variation du terme quadratique est proportionnelle à la distance d'observation. Une correction est nécessaire quand la migration devient supérieure à la dimension de la case de distance, ce qui est souvent le cas pour les radars de satellite, compte tenu des résolutions recherchées.

3 - CRITERES DE QUALITE DE L'IMAGE

Plusieurs critères servent à définir la qualité d'une image radar : résolution spatiale et radiométrique, contraste, conformité.

3.1. Résolution spatiale

Elle est définie généralement comme étant la largeur à mi-puissance ($- 3$ dB) du signal issu d'un objectif ponctuel et vu par le radar. Ce signal est obtenu après traitement suivant deux directions orthogonales, au moyen de deux fonctions de corrélation. Ces deux fonctions comportent chacune un pic principal et des lobes secondaires dont on cherche à minimiser le niveau.

La résolution en distance radar dépend directement de la largeur de spectre du signal émis et de l'angle d'observation par rapport au sol. La résolution en azimut dépend de la largeur du spectre Doppler des signaux traités.

3.2. Résolution radiométrique

Une des applications des radars haute résolution à antenne synthétique est la mesure du coefficient de réflectivité σ_0 du sol observé. La puissance du signal détecté en sortie du traitement est directement proportionnelle à ce coefficient.

La précision de mesure de σ_0 dépend des fluctuations ou perturbations rencontrées sur le signal détecté. La résolution radiométrique permet d'apprécier la précision de mesure relative de σ_0 . Elle est définie en décibels par :

$$\rho = 10 \log (1 + \sigma_p/\bar{p}) \quad (15)$$

où σ_p représente l'écart type de la puissance du signal détecté, et \bar{p} la valeur moyenne de cette puissance.

Les principales causes de fluctuations sont la granulation et le bruit thermique du radar. Les autres causes, d'importance moindre, sont les ambiguïtés, les non-linéarités du radar, l'effet des perturbations atmosphériques.

a) La granulation : une surface "lisse" de coefficient de réflectivité moyen constant est restituée avec une modulation de puissance qui suit une loi de Rayleigh. C'est un phénomène naturel lié à la réflexion des ondes radar. Ce phénomène est tout à fait équivalent à celui observé quand une onde lumineuse monochromatique (laser) éclaire un objet lisse. Cette granulation constitue un bruit multiplicatif dont l'écart type est égal à la valeur moyenne.

b) Le bruit thermique : c'est le bruit dû aux premiers étages de réception du radar. Il ajoute à la carte radar une modulation de puissance constante. C'est un bruit additif lié au bilan énergétique du radar.



IMAGERIE RADAR À OUVERTURE SYNTHÉTIQUE : APPLICATIONS AÉROPORTÉES ET SPATIALES
 SYNTHETIC APERTURE IMAGING RADAR : AIRBORNE AND SPACEBORNE APPLICATIONS
 PIERRE ANTHOUARD

Pour améliorer la précision de mesure de σ_0 , ces bruits sont atténués en effectuant des moyennes sur plusieurs observations indépendantes situées dans l'échantillon de sol à analyser. Plusieurs méthodes sont envisageables :

- utiliser une image radar à résolution élevée permettant de définir plusieurs cellules indépendantes dans la surface de l'échantillon à analyser, dont on fera la moyenne,
- générer des images indépendantes en granulation et bruits en utilisant plusieurs voies de traitement en parallèle (multivue) dont on effectue la moyenne après détection. Pour ce faire, la bande Doppler B est divisée en n sous-bandes ; le traitement de chaque sous-bande permet de générer une image dont la résolution ne peut être meilleure que $n.L/2$.

Il est possible de combiner les deux méthodes. A titre d'exemple, pour un rapport signal à bruit de 6 dB il faut, pour obtenir une résolution radiométrique de 1 dB, moyenner de l'ordre de 35 observations indépendantes.

3.3. Contraste

L'image radar peut être décomposée en deux parties :

- une image utile qui concentre la majeure partie de l'énergie reçue et qui possède la résolution spatiale recherchée,
- une image parasite qui vient se superposer à la première et limiter le contraste.

L'image parasite possède une double origine : d'une part les ambiguïtés distance et azimut qui se présentent sous la forme d'images décalées et atténuées par rapport à l'image principale ; d'autre part le piédestal (lobes secondaires et diffus) des fonctions de corrélation en distance et azimut. Ce piédestal génère une image parasite "floue".

Le contraste de l'image peut être défini par le critère du "trou". Ce critère s'applique à une surface de sol homogène infinie de coefficient de réflectivité σ_0 dans laquelle est découpé un carré dont les côtés sont parallèles aux axes du traitement. Ce carré découpe une surface supposée non réfléchissante ($\sigma_0 = 0$). A cause des ambiguïtés et du piédestal des fonctions de corrélation, l'intérieur du carré est "pollué" par du signal en provenance de la surface réfléchissante. Le contraste est défini comme le rapport entre la puissance utile σ_0 et la puissance parasite présente à l'intérieur du trou. La figure 7 illustre ce phénomène. Dans l'évaluation du contraste il faut aussi tenir compte de la puissance du bruit thermique présent sur toute l'image.

L'amélioration du contraste passe en particulier par la diminution du piédestal des fonctions de corrélation. Ceci est obtenu en pondérant l'amplitude des fonctions de référence utilisées aussi bien dans la compression d'impulsion en distance que dans le traitement d'azimut, au prix d'une légère perte en résolution.

3.4. Conformité géométrique

Une bonne conformité géométrique est indispensable pour superposer ou comparer des images de la même région ou pour localiser précisément un point quelconque de l'image par rapport à des points de référence.

Elle nécessite, suivant les cas, des corrections sur l'image brute disponible en sortie du traitement. Ces corrections s'appliquent en "distance radar" : il y a en effet distorsion entre la distance oblique dans la direction d'observation et la distance horizontale.

Elles s'appliquent aussi en azimut, par exemple pour redresser l'image quand l'éclairement de l'antenne n'est pas perpendiculaire à la route du porteur.

3.5. Conformité radiométrique

Pour obtenir une image homogène et pour effectuer des mesures de coefficient de réflectivité σ_0 , il est nécessaire de corriger l'intensité des différents points de l'image pour qu'elle soit proportionnelle à σ_0 avec le même coefficient de proportionnalité en tout point. De plus, dans l'hypothèse où une bonne précision est recherchée sur la mesure absolue de σ_0 , il faut calibrer le radar, par exemple en disposant au sol des réflecteurs ponctuels de surface équivalente radar connue (trièdres, lentilles de Luneberg,...).

4 - DESCRIPTION DES PRINCIPAUX SOUS-ENSEMBLES

Un radar à antenne synthétique se compose principalement d'une antenne éventuellement stabilisée, d'un émetteur-récepteur cohérent, de circuits de transcription de données, et d'une unité de traitement de signal. Les circuits de traitement font l'objet du § 5.

4.1. Antenne

L'antenne est orientée sur le côté du porteur, à 90° environ de sa route. Sur avion, elle est stabilisée, au moins en lacet, souvent en roulis et tangage, de façon à conserver une direction d'éclairement constante malgré les mouvements du porteur.

Sur satellite, l'antenne est en général rigidement liée au porteur beaucoup plus stable qu'un avion, et s'il faut modifier l'orientation du faisceau (par exemple pour compenser le Doppler moyen) c'est l'ensemble antenne + satellite qui est piloté.

Les dimensions des antennes (longueur typiquement de 1 à 2 mètres sur avion, 10 à 15 mètres sur satellite) et les qualités requises sur les diagrammes d'antenne (en amplitude et phase) sont telles que la partie rayonnante est constituée soit de guides à fente soit de circuits imprimés (cas des antennes de SEASAT et de SIR-A).

4.2. Emission-Réception

L'émetteur-récepteur du radar génère l'impulsion émise à forte puissance et comprend les circuits de réception qui délivrent après détection cohérente l'amplitude et la phase des signaux. La recherche d'une bonne résolution en distance (large spectre émis) nécessite pour ne pas avoir à émettre de fortes puissances crête la mise en oeuvre de techniques de compression d'impulsion.

Ces techniques consistent à émettre une grande énergie par le produit d'une grande durée d'impulsion (plusieurs dizaines de microsecondes) et d'une relativement faible puissance crête (quelques kW). Un large spectre est obtenu en modulant l'impulsion longue émise. En réception, l'impulsion est comprimée au moyen d'un traitement adapté au type de modulation émise.

La modulation la plus couramment utilisée est la modulation linéaire de fréquence à cause de sa faible sensibilité au décalage Doppler et grâce aux taux de compression importants qu'elle autorise.

L'émetteur-récepteur comprendra en général deux sous-ensembles :

- une émission-réception à bas niveau,
- un amplificateur de puissance hyperfréquence.

La figure 8 représente le schéma synoptique d'une chaîne d'émission-réception.

L'impulsion d'émission à bas niveau est générée à partir d'une impulsion fine découpée, en fréquence intermédiaire, dans une onde issue d'un oscillateur pilote de base. Cette impulsion est dispersée dans un dispositif à ondes acoustiques de surface (SAW) et donne naissance à une impulsion longue modulée linéairement en fréquence, laquelle est transposée en hyperfréquence et amplifiée.

À la réception les signaux sont amplifiés au moyen d'un amplificateur faible bruit hyperfréquence. Le signal est ensuite ramené en fréquence intermédiaire passe dans la ligne de compression, complémentaire de celle utilisée à l'émission (pente fréquence-temps inversée) et est détecté de façon cohérente par mélange avec l'onde utilisée pour la génération de l'impulsion d'émission. Le résultat du mélange est constitué, en général, de deux signaux vidéo fréquence en quadrature.

L'amplificateur de puissance hyperfréquence est caractérisé par sa puissance crête (quelques kW) et sa puissance moyenne (de quelques dizaines à quelques centaines de Watts suivant l'application).

La technologie employée dépend de la fréquence et de la puissance.

En bande L et pour des puissances moyennes inférieures à 100 W, des amplificateurs "état solide" sont disponibles (cas de SEASAT). À des fréquences plus élevées (bande C et bande X) il est nécessaire d'utiliser des tubes de puissance : tube à ondes progressives (T.O.P.) ou klystron.

4.3. Transcription de données

Les circuits de transcription ou de manipulation de données diffèrent suivant le concept de radar choisi : avec ou sans transmission hertzienne des données, et dans ce dernier cas, avec ou sans traitement à bord.

La transmission hertzienne des données est généralement utilisée pour transmettre les données brutes en sortie du récepteur vers une station sol qui contient les circuits de traitement. Ce concept est applicable aussi bien aux radars aéroportés qu'aux radars embarqués sur satellite.

Suivant les cas les données brutes sont transmises :

- directement sous forme analogique (cas de SEASAT),
- après conversion analogique-numérique et éventuellement prétraitement, sous forme numérique avec une quantité d'information qui peut atteindre la centaine de mégabits par seconde.

L'utilisation de la transmission hertzienne n'interdit pas la mise en oeuvre, à bord, d'un système d'enregistrement optique ou magnétique des données brutes.

Dans le cas où le traitement est effectué en temps réel à bord (cas le plus rare) les données issues du récepteur sont directement envoyées vers le système de traitement. L'image de sortie est soit enregistrée (film, magnétoscope, papier à développement instantané) soit transmise par voie hertzienne vers les systèmes d'exploitation au sol, avec un débit moindre que pour les données brutes (division au moins par deux).

Dans les autres hypothèses, les données brutes sont enregistrées sur film (cas du traitement optique), ou, après numérisation, sur bande magnétique haute densité. Il faut alors attendre le retour de l'avion, ou de la navette, pour traiter les données et visualiser les images !

5 - CIRCUITS DE TRAITEMENT D'ANTENNE SYNTHÉTIQUE

Le sous-ensemble de traitement représente la partie la plus importante et la plus complexe d'un radar à antenne synthétique. Plusieurs catégories de traitement existent : temps réel ou temps différé, embarqué ou au sol. Diverses technologies sont envisageables pour la réalisation du traitement en azimut : l'optique, le numérique, les dispositifs à ondes acoustiques de surface (SAW), les dispositifs à transfert de charge (CCD) [5], [6]. Les plus couramment utilisés sont les systèmes de traitement optiques qui ont été les premiers mis en oeuvre, et les systèmes numériques, qui sont les plus souples.

5.1. Traitement optique

La géométrie du système est telle que ce type de traitement est particulièrement adapté au problème posé [4]. En effet, le signal reçu d'un écho ponctuel est de la forme :

$$S_R(t) = A \cos(\phi_0 + k t^2) \quad (16)$$

Il est inscrit en transparence sur un film qui se déplace à une vitesse proportionnelle à la vitesse du porteur V. Le signal temporel $S_R(t)$ est transformé en une fonction spatiale $S_R(x)$ avec $x = Vt$ (au facteur d'échelle près).

En éclairant ce film avec une onde plane monochromatique, on observe trois ondes émergentes (figure 9) :

- une onde plane de même nature que l'onde incidente,
- une onde divergente de centre O1,
- une onde convergente de centre O2.

Les points O1 et O2 se situent par rapport à la position du film à une distance proportionnelle à la distance D des échos. La décomposition optique ainsi obtenue est liée à l'axe de symétrie de la fonction $S_R(x)$ inscrite, donc à la position du film le long de x. Une fente très fine, fixe, placée en O2 recevra un flux lumineux important. Un film de sortie placé derrière cette fente inscrira un signal comprimé quand l'axe de symétrie de la fonction $S_R(x)$ passera en face de la fente.

Une bonne dynamique de l'image suppose que soient éliminées les ondes parasites. Ceci est réalisé en ajoutant une porteuse au signal enregistré. De ce fait, la position des différentes ondes devient celle représentée sur la figure 10. La composante utile (onde convergente) est recueillie derrière une fente disposée en dehors des faisceaux des ondes parasites.



De façon à compenser les variations de distance focale dues aux écarts de distance des échos, on utilise une lentille conique dont les caractéristiques sont liées à la géométrie du système.

Le traitement optique est le premier à avoir été utilisé pour les radars à antenne synthétique. Il est cependant assez peu souple d'emploi : définition de l'optique liée à une géométrie donnée, utilisation de films pour enregistrer les signaux d'entrée et l'image de sortie. Ceci rend très difficile une utilisation en temps réel et conduit à un volume de matériel important pratiquement impossible à embarquer.

Toutefois des progrès récents dans le domaine des dispositifs acousto-optiques et des réseaux de détecteurs CCD, qui pourraient remplacer les films, risquent de redonner une seconde jeunesse aux systèmes de traitement optiques.

5.2. Traitement numérique

Contrairement au traitement optique, les autres systèmes de traitement et en particulier le traitement numérique, nécessitent un échantillonnage du signal vidéo fréquence en sortie du récepteur radar. Cet échantillonnage est fonction de la durée d'impulsion fine du radar et découpe la zone visualisée en cases de distance.

Le traitement d'antenne synthétique est effectué parallèlement dans chacune des cases de distance. Il est constitué d'une suite d'opérations arithmétiques sur des échantillons de signaux pour réaliser soit une opération de corrélation (traitement temporel) soit des transformées de Fourier (traitement fréquentiel).

L'utilisation du traitement numérique apporte une grande souplesse aux traitements d'antenne synthétique : adaptation à la géométrie, grande dynamique, possibilité de temps réel. Cependant le grand nombre de calculs à effectuer nécessite le choix d'algorithmes performants pour ne pas consacrer des heures à synthétiser une image de quelques kilomètres carrés !

A titre d'exemple, le traitement temps réel peut nécessiter suivant les cas entre 10^9 et 10^{11} multiplications par seconde, que ce soit pour des applications aéroportées ou spatiales !

Il existe plusieurs types d'algorithmes. Une organisation particulière est proposée ci-dessous. Le schéma synoptique en est donné à la figure 11.

Le signal vidéo fréquence après démodulation cohérente, est constitué de deux composantes en quadrature X et Y. Chacune de ces composantes est échantillonnée dans la partie utile de réception correspondant à la zone de sol visualisée, et chaque échantillon est converti sous forme numérique. Le nombre de bits dépend de la dynamique des signaux à traiter ; il est généralement compris entre 5 et 8. Par contre, les cadences d'échantillonnage sont élevées (jusqu'à 50 MHz).

Le signal passe ensuite dans des filtres dits de pré-traitement. Ils ont pour but de limiter la bande passante des signaux compte tenu de la résolution recherchée en azimut, et permettre un sous-échantillonnage du signal. Ce sous-échantillonnage optimise la quantité d'information à traiter.

Ces filtres sont du type passe-bas, identiques sur chacune des voies X ou Y, dans l'hypothèse où le spectre des signaux reçus est centré autour de la fréquence nulle (après correction éventuelle du Doppler moyen).

Les échantillons de signal sont ensuite mémorisés soit sous forme amplitude et phase (ρ_s, ϕ_s) soit sous forme des composantes en quadrature (x_s, y_s). La dimension de la mémoire, "en azimut", (nombre m de périodes de récurrence mémorisées après sous-échantillonnage éventuel) dépend de la résolution recherchée.

Le nombre m est au moins égal au taux de compression BT qui est en général de quelques centaines.

La dimension de la mémoire "en distance" est égale au nombre de cases de distance et peut atteindre plusieurs milliers.

La chaîne de traitement comprend ensuite le corrélateur. Il effectue la corrélation entre le signal mémorisé dans chacune des cases et le signal de référence généré ou contenu dans les circuits de traitement. Si ρ_r et ϕ_r sont respectivement l'amplitude et la phase du signal de référence alors S, résultat du calcul s'écrit :

$$S(n) = \sum_i \rho_s(i-n) \rho_r(i) e^{j[\phi_s(i-n) - \phi_r(i)]} \quad (17)$$

La sommation s'étend sur les m échantillons de la fonction de référence. L'amplitude de S(n) qui représente un échantillon de l'image radar est envoyée vers un enregistreur ou un système de visualisation.

Dans un corrélateur numérique, la fonction S(n) est calculée point par point, le calcul de chaque point à partir de signaux complexes nécessite 4 m multiplications et 4 m additions. L'utilisation de quantifications particulières et d'approximations dans les calculs permet de s'affranchir de certaines multiplications rapides

Le synoptique décrit ci-dessus, défini pour un radar aéroporté ne comporte pas de dispositifs de correction de migration qui sont nécessaires pour le traitement des signaux issus d'un radar sur satellite.

Dans le domaine spatial, la notion de temps réel n'a pas nécessairement la même importance que pour un radar aéroporté (en particulier un radar de reconnaissance militaire) ; aussi les algorithmes de traitement tels que ceux décrits, ou d'autres (FFT), sont souvent programmés sur des ordinateurs d'usage général couplés ou non à un processeur matriciel spécialisé.

Par ailleurs, le traitement numérique est bien adapté à l'implantation d'algorithmes particuliers pour mesurer la fréquence Doppler moyenne des signaux et dans certains cas la pente Doppler (focalisation automatique).

6 - EXEMPLES DE RADARS A ANTENNE SYNTHETIQUE

6.1. Radars aéroportés

Les radars à antenne synthétique aéroportés ont été réservés jusqu'à maintenant essentiellement à des usages militaires. Leurs caractéristiques précises restent classifiées.

Les radars RAFAL et RAPHAEL étudiés et réalisés en France ont permis de mettre au point les techniques d'antenne synthétique aussi bien optiques que numériques temps réel.

Ces radars permettaient l'observation de zones de terrain situées à droite ou à gauche du porteur et larges de 5 à 10 km. Ces matériels étaient prévus pour voler à relativement basse altitude. La résolution en distance comme en azimut était de l'ordre de quelques mètres. Ils utilisaient une émission-réception à compression d'impulsion.



IMAGERIE RADAR À OUVERTURE SYNTHÉTIQUE : APPLICATIONS AÉROPORTÉES ET SPATIALES

SYNTHETIC APERTURE IMAGING RADAR : AIRBORNE AND SPACEBORNE APPLICATIONS

PIERRE ANTHOUARD

Le traitement était effectué au sol en optique ou sous forme numérique.

Pour utilisation avec le traitement optique le signal en sortie du récepteur était enregistré sur film. Pour utilisation avec le traitement numérique les deux composantes X et Y après numérisation étaient enregistrées sur bandes magnétiques avec un débit de l'ordre de 20 Mbits/s. Ces enregistrements numériques relus à la même vitesse que la vitesse d'enregistrement ont servi à tester les capacités temps réel du traitement.

Actuellement est en cours de développement en France le système RAPHAEL TH, dérivé des précédents. Il permet l'observation de domaines plus larges à de grandes distances. Le traitement et l'exploitation sont réalisés au sol en temps réel après transmission des données par voie hertzienne. Le traitement est réalisé sous forme numérique au moyen de calculateurs spécialisés, il est capable de plusieurs milliers de cases de distance.

Un autre radar à antenne synthétique est développé en France pour diverses applications aussi bien civiles que militaires. Il est constitué de l'association d'un radar de surveillance aéroporté à compression d'impulsion VARAN et d'un coffret de traitement à antenne synthétique ANACONDA [7]. Ce coffret autorise le traitement en temps réel à bord sur 500 cases de distance. Quatre modes de fonctionnement sont disponibles dont les résolutions vont de 10 à 80 mètres et les domaines couverts de 5 à 40 km. Les images en sortie du coffret sont présentées sur un écran de télévision et/ou enregistrées sur magnétoscope.

6.2. Radars sur satellite

Les radars sur satellite sont caractérisés par des antennes de grandes dimensions et par des puissances moyennes importantes, quelques centaines de watts.

Les domaines couverts sont en général un peu plus grands que ceux couverts par les radars aéroportés mais les résolutions sont moins bonnes. Il y a typiquement pour l'instant un rapport dix entre les deux.

Les traitements sont déportés au sol où les signaux sont transmis par voie hertzienne. Les différents traitements, optiques et numériques sont utilisés.

Les radars sur satellite qui ont été réalisés et expérimentés dans le monde occidental pour des missions civiles sont aujourd'hui au nombre de deux : SEASAT et SIR-A. Ils fonctionnaient tous les deux en bande L. De nombreuses publications ont été faites à leur sujet. Les principales caractéristiques du radar de SEASAT sont en particulier fournies par R.L. Jordan [8]. A noter qu'un radar à antenne synthétique a également été monté sur APOLLO 17 pour étudier la surface de la lune. Il fonctionnait à des fréquences très basses (entre 5 et 150 MHz).

Dans le domaine spatial, d'autres radars à antenne synthétique sont à l'étude ou en cours de développement aux Etats-Unis, au Canada, en Europe et au Japon; ce sont notamment SIR-B (bande L) sur la navette en 1984, le programme Européen ERS1 (bande C) en 1987 et le programme américain SAMEX toujours sur la navette, qui comporte plusieurs radars en bande L, C, X prévus pour être expérimentés entre 88 et 90.

7 - APPLICATIONS

Les applications des radars d'imagerie haute résolution sont multiples, aussi bien dans le domaine civil que dans le domaine militaire.

L'intérêt du radar réside dans le fait que les fréquences utilisées, généralement entre 1 et 10 GHz sont assez insensibles aux phénomènes atmosphériques. En particulier la propagation n'est pas affectée par les couches nuageuses ce qui offre un grand intérêt pour les systèmes radar d'observation sur satellite. De plus le radar est un senseur actif qui possède sa propre source d'éclairage ; il constitue donc un système tout temps.

Par ailleurs, l'utilisation des hyperfréquences apporte des informations nouvelles par rapport aux capteurs plus classiques fonctionnant dans les domaines visibles et infrarouge, et souvent complémentaires.

L'inconvénient du radar est d'être monochromatique, un émetteur-récepteur fonctionne à une fréquence, dans une polarisation choisie. Des informations plus riches seraient disponibles en utilisant plusieurs fréquences et plusieurs polarisations mais au prix d'une plus grande complexité du matériel.

En ce qui concerne les applications civiles, nombreux sont les thèmes de recherche où le radar joue un rôle important [9], [10]. Il est en particulier utilisable dans les domaines suivants :

a) géologie

Le radar met en évidence toutes les discontinuités rencontrées à la surface de la terre et permet de dresser les cartes de structures géologiques. Pour cette application, l'angle de visée joue un rôle important.

b) océanologie

Le radar permet quelle que soit la couverture nuageuse de dresser une carte de la surface des océans. Ceci met en évidence la direction des vagues (orientation des vents), les courants, les tourbillons. SEASAT a montré qu'il était également possible d'avoir l'image des fonds marins quand ils sont peu profonds. D'autres utilisations dans ce domaine concernent la détection des pollutions par hydrocarbure et la surveillance du trafic maritime et des zones de pêche.

c) hydrographie

Les applications en hydrographie sont nombreuses avec en particulier l'évaluation de l'humidité des sols, paramètre important pour l'agriculture ; il a été montré que la bande C (5 GHz) était la mieux appropriée pour cela bien que des résultats intéressants aient été obtenus avec SEASAT. Le radar permet aussi de dresser des cartes des étendues d'eau, fleuves, rivières, lacs ou inondations, ainsi que des surfaces enneigées.

d) glaces

La surveillance radar régulière, par un satellite, des étendues de glaces dans les régions polaires permet d'en mesurer les déplacements. Le radar est utilisé également pour détecter et localiser les icebergs.

e) agriculture

Les images radar du sol montrent bien les différents champs ou étendues de culture. Le coefficient de réflectivité σ_0 diffère suivant le type de végétation. Aussi il semblerait intéressant d'utiliser le radar pour recenser ou surveiller les cultures. C'est un domaine où les informations fournies sont complémentaires de celles délivrées par les capteurs visibles ou infrarouge.



Le radar pourrait être utilisé seul dans la mesure où la surveillance dure plusieurs mois ; en effet, il semble que la variation de σ_0 , pour un type de végétation au cours d'une année, soit une signature assez typique de celle-ci.

Dans le domaine de l'étude du couvert végétal, il est préférable d'utiliser des fréquences supérieures à 8 GHz, avec des angles de visée par rapport à la verticale supérieurs à 40°, ceci afin de minimiser les effets dus à la rugosité du sol et à l'humidité.

f) cartographie

L'imagerie radar haute résolution est particulièrement bien adaptée à l'établissement de cartes dans les pays très souvent couverts par les nuages (par ex : Amazonie).

Dans la majorité des applications ci-dessus, on cherche à mesurer le coefficient de réflectivité σ_0 . Sa mesure précise suppose une bonne calibration et une réduction de la granulation qui ne peut être obtenue qu'au prix d'une dégradation de la résolution spatiale.

En ce qui concerne le domaine militaire, on privilégiera davantage la résolution spatiale pour des missions telles que :

- reconnaissance et désignation d'objectifs,
- surveillance des évolutions du terrain par comparaison entre plusieurs images décalées dans le temps,
- recalage de navigation.

Pour ce type de missions le radar offre les avantages d'être tout temps, d'éviter de survoler les objectifs, d'autoriser une bonne résolution à grande distance.

8 - CONCLUSION

Les radars à antenne synthétique nécessitent le traitement d'énormes quantités d'information et sont de ce fait souvent à l'avant-garde du point de vue technique et technologique.

Parmi les principales tendances qu'il est possible de dégager aujourd'hui dans l'évolution de ces matériels, il convient de noter :

- les radars multifréquences et multipolarisations,
- les antennes réseaux à balayage électronique pour adapter la forme et l'orientation des diagrammes en fonction des missions,
- les amplificateurs de puissance "état solide" en fréquence élevée (bandes C et X) autorisant une meilleure fiabilité,
- le développement des processeurs de traitement temps réel, de plus en plus intégrés, utilisables éventuellement sur satellites, ceci afin d'avoir à transmettre seulement l'image ou certaines informations contenues dans l'image.

Cependant, quels que soient les progrès de la technologie, le radar à antenne synthétique restera un senseur d'une grande complexité et donc coûteux, d'autant plus que les quantités produites seront limitées.

En ce qui concerne l'exploitation des images, beaucoup de travail est encore à faire, dans tous les domaines d'applications, à cause de la diffusion récente de ce type d'image et de la relative nouveauté des capteurs. L'exploitation et l'interprétation des images radar possède environ vingt ans de retard par rapport à celles de la photographie classique.

REMERCIEMENTS

La rédaction de cet article s'appuie sur de nombreux travaux financés par l'Administration Française, qui par l'intermédiaire du Service Technique des Télécommunication et des Equipements aéronautiques (S.T.T.E.) a permis le développement en France des radars à antenne synthétique, en soutenant cette activité depuis 25 ans.

REFERENCES

- [1] L.J. Cutrona, W.E. Vivian, E.N. Leith, and G.O. Hall, "A High Resolution Radar Combat - Surveillance System", IRE Trans. Mil. Electron., vol. MIL-5, N° 2, pp 127-131, Avril 1961.
- [2] C.W. Sherwin, J.P. Ruina, and R.D. Rawcliffe, "Some Early Developments In Synthetic Aperture Radar Systems", IRE Trans. Mil. Electron., vol MIL-6, N° 2, Avril 1962
- [3] G. Révillon, "Radar à faisceau latéral utilisant une antenne synthétique", AGARD AVIONICS PANEL on Advanced Techniques for Aerospace Surveillance, 1967
- [4] J. Génouist, "Radar à faisceau latéral utilisant une antenne synthétique", AGARD Conf. Proc. 197 on New Devices, Techniques and Systems in Radar, pp 17/1- 17/5, 1976
- [5] P. Anthouard et J.C. Baron, "Radar à antenne latérale synthétique et systèmes de traitements associés", Colloque International sur le Radar, Paris, Décembre 1978
- [6] P. Anthouard et T. Beauvais, "Applications d'un convoluteur piézoélectrique au Traitement du Signal Radar", AGARD Conf. Proc. 230 on Impact of CCD and SAW Devices on Signal Processing and Imagery in Advanced Systems, pp 5.4/1-5.4/17, 1977
- [7] P. Anthouard, "A multipurpose Synthetic Aperture Radar", Proc. of International Radar Symposium India, Octobre 1983
- [8] R.L. Jordan, "The Seasat-A synthetic aperture radar system", IEEE J. Oceanic Eng., vol OE-5, pp 154-163, Avril 1980
- [9] C. Elachi et al., "Spaceborne Synthetic-Aperture Imaging Radars : Applications, Techniques, and Technology", Proc. IEEE, vol. 70, N° 10, pp 1174-1209, Octobre 1982
- [10] F.T. Ulaby, "Radar Signatures of Terrain : Useful Monitors of Renewable Resources", Proc. IEEE, vol. 70, N° 12, pp 1410-1428, Décembre 1982

IMAGERIE RADAR À OUVERTURE SYNTHÉTIQUE : APPLICATIONS AÉROPORTÉES ET SPATIALES
 SYNTHETIC APERTURE IMAGING RADAR : AIRBORNE AND SPACEBORNE APPLICATIONS
 PIERRE ANTHOUARD

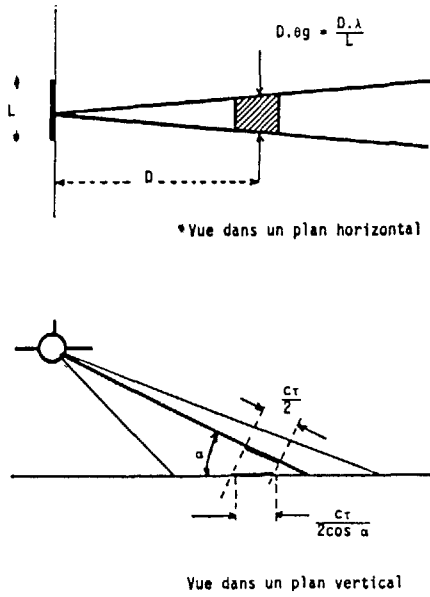


FIGURE 1 : RESOLUTION DU RADAR

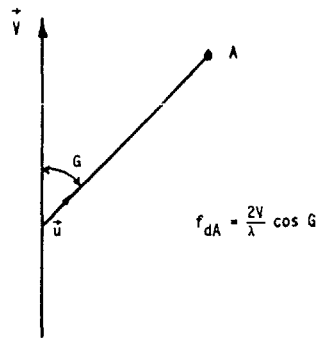


FIGURE 2 : EFFET DOPPLER

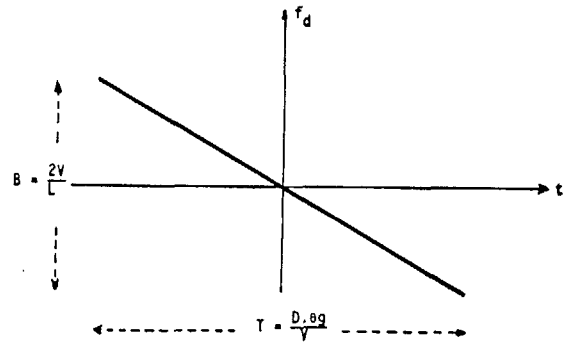
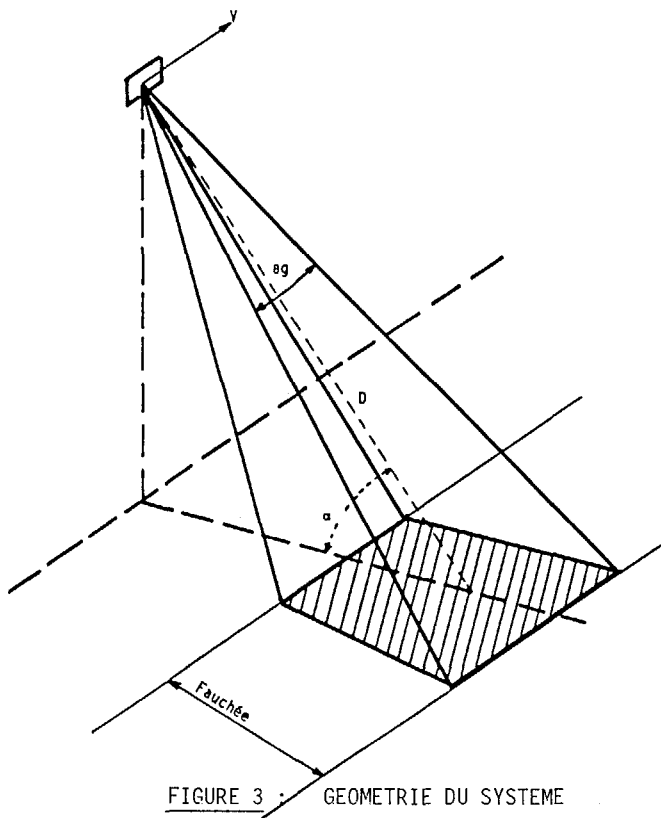


FIGURE 4 : LOI DE VARIATION DU DOPPLER

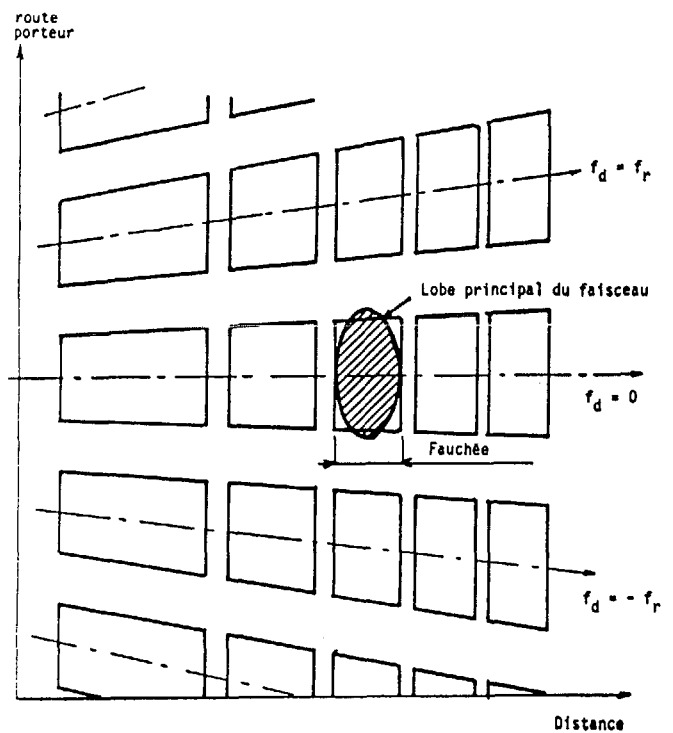


FIGURE 5 : AMBIGUITES SUR LE SOL

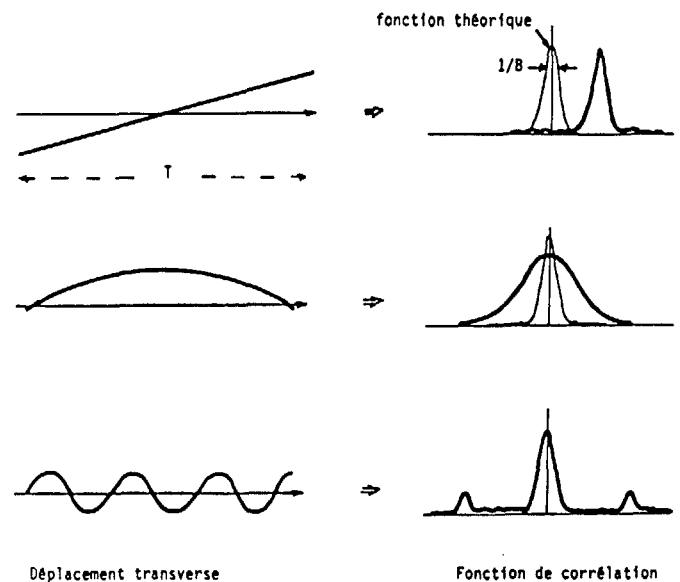


FIGURE 6 : INFLUENCE DES MOUVEMENTS TRANSVERSES



IMAGERIE RADAR À OUVERTURE SYNTHÉTIQUE : APPLICATIONS AÉROPORTÉES ET SPATIALES
 SYNTHETIC APERTURE IMAGING RADAR : AIRBORNE AND SPACEBORNE APPLICATIONS
 PIERRE ANTHOUARD

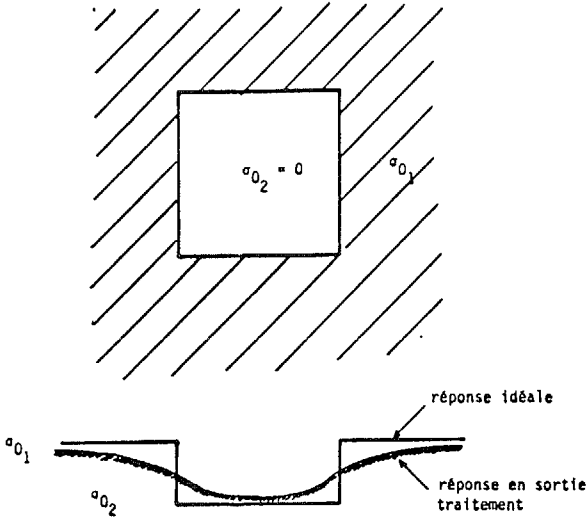


FIGURE 7 : CRITERE DE CONTRASTE

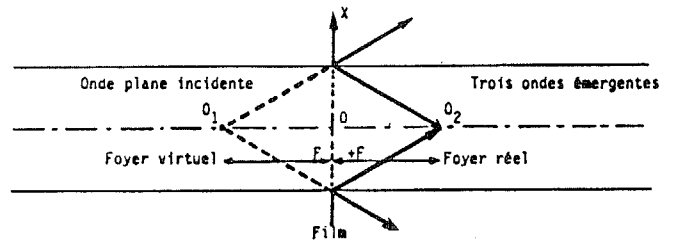


FIGURE 9 : TRAITEMENT OPTIQUE SANS PORTEUSE

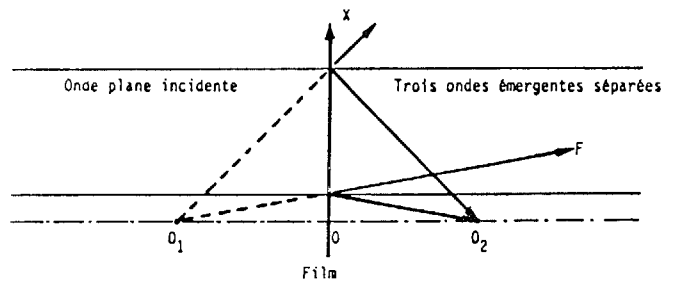


FIGURE 10 : TRAITEMENT OPTIQUE AVEC PORTEUSE

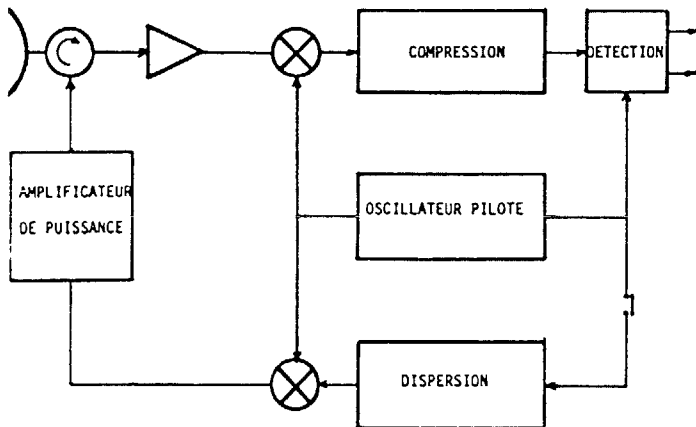
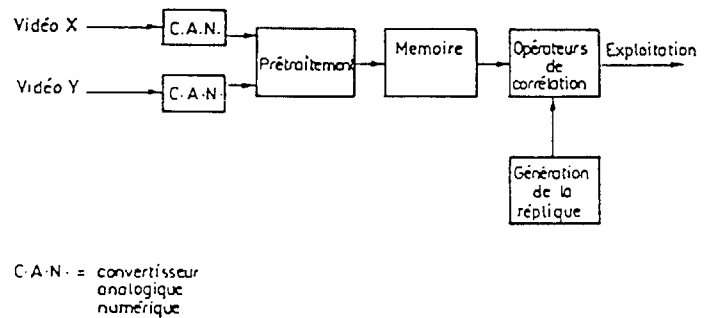


FIGURE 8 : SYNOPTIQUE EMISSION-RECEPTION



C.A.N. = convertisseur analogique numérique

FIGURE 11 : SYNOPTIQUE DE TRAITEMENT NUMERIQUE