

COLLOQUE NATIONAL SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 16 au 21 JUIN 75



12/1

TRAITEMENT DU SIGNAL RADAR

RADAR SIGNAL PROCESSING

Guy LE PARQUIER

THOMSON-C. S. F. - 173, boulevard Haussmann - 75008 PARIS -

RESUME

Tous les dispositifs de traitement du signal utilisés dans les radars ont pour but essentiel de faire apparaître un contraste entre le signal utile et la "pollution" de l'environnement : bruit du récepteur, clutter de sol ou de mer, nuages et précipitations atmosphériques, anges, échos de deuxième (ou n^{ème}) récurrence, sans compter les brouillages.

Différentes techniques sont utilisées pour faire apparaître ce contraste :

- tout d'abord au niveau de chaque écho en le comparant à l'environnement : récepteur à taux de fausse alarme constant (TFAC), filtres transverses et comparateurs, compression d'impulsion, dépointage du faisceau d'antenne, suppression des échos de lobe secondaire (SLS),
- ensuite en traitant les échos obtenus lors de récurrences successives : filtrage Doppler, bipulse analyse de spectre, comparateurs en surface, répétitivité (extracteur), élaboration de piste, antenne adaptative, changement de porteuse et de fréquence de récurrence, critères de vraisemblance,
- enfin dans les radars de poursuite : réduction de la cellule de résolution en distance, vitesse, angle solide, et leurs dérivées, optimisation de la fréquence de récurrence et de la longueur d'onde, intégration,
- pour les radars de cartographie très fine à antenne synthétique : corrélation des différents échos obtenus pendant le passage du faisceau sur le but.

SUMMARY

The aim of all radar signal processing devices is to make appear a contrast between the useful signal and the environmental "pollution" : receiver noise, ground or sea clutter, clouds, rain, hail, snow, "angels", second (or nth) recurrence echoes, eventually jamming.

Various techniques are used to make such contrast appear :

- through the comparison of each echo with the environment : receiver with constant false alarm ratio, Transverse filter and comparators, pulse compression, off centering of antenna beam, side-lobe suppression.
- through the processing of echoes received from one target, doppler filtering, dual pulse technique, spectrum analysis, comparison of echo with its near environment, repetitiveness (extractor), track elaboration, adaptive antenna, change of wavelength and for pulse frequency, expectation criteria.
- in tracking radar, through : reduction of the resolution cell, in range, velocity, solid angle, and their differentials, optimization of the recurrence frequency, of the wavelength, integration.
- in high resolution ground-mapping radar with synthetic antenna through the correlation of the various echoes obtained during the illumination of the target by the beam.

Some examples of the use of the above methods are given.



Si dans un radar il est relativement facile de détecter les échos en présence du bruit blanc du récepteur en utilisant un filtre adapté maximisant le signal utile, il en est tout autrement lorsque la réception est perturbée par une " pollution radio-électrique ".

Différentes techniques sont utilisées qui ont toutes pour but d'accroître le contraste entre les signaux utiles et les parasites. Le traitement cherche davantage à réduire les signaux perturbateurs qu'à maximiser le signal utile. Des filtres réjecteurs analogiques ou logiques, orthogonaux si possible avec les parasites, sont utilisés pour atténuer au maximum les signaux indésirables.

A titre d'exemple les signaux perturbateurs suivants peuvent être présents dans un radar :

- échos de sol, fond continu et obstacles,
- nuages et anges (perturbations causées le plus souvent par des oiseaux migrateurs ou des nuées d'insectes),
- échos de sol de deuxième trace. Ils correspondent à des échos lointains reçus après un retard supérieur à une récurrence et se mélangent ainsi aux échos proches,
- brouillage par des radars voisins,
- brouillage volontaire par des émetteurs spéciaux saturant la réception,
- brouillage volontaire par des répondeurs créant de fausses pistes.

Nous ne pouvons traiter tous ces problèmes dans le cadre d'une conférence, aussi nous nous limiterons à classer les différentes méthodes de traitement utilisées pour accroître, conserver (ou perdre le moins possible) la probabilité de détection tout en réduisant la fausse alarme à une valeur acceptable quelles que soient les conditions d'exploitation.

On peut voir le résultat obtenu sur une image PPI par un ensemble de traitement, figures n° 1 et 2.

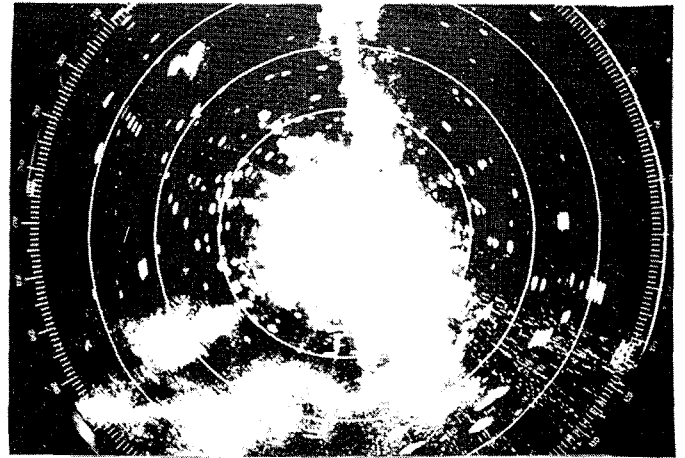


fig. n° 1. Vidéo brute.

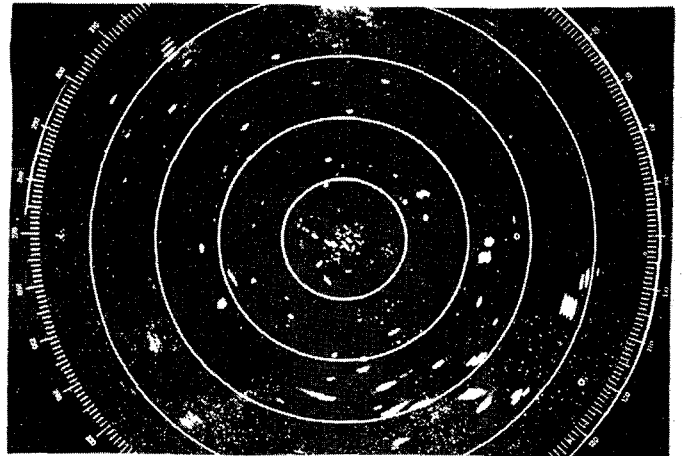


fig. n° 2. Vidéo traitée.

Cette image dépouillée de tout signal superflu est indispensable si on veut " habiller " les pistes, figure n° 3. par tous les autres renseignements

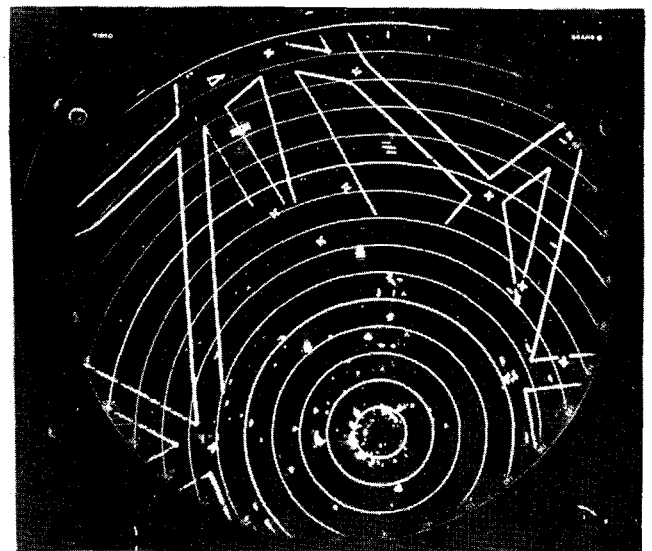


Fig. n° 3. Image " habillée partiellement "



connus sur la piste tels que : altitude, identité de l'avion, numéro de vol, vitesse etc ... qui sont fournis et corrélés par un ordinateur.

L'exposé des traitements utilisés sera regroupé en :

- traitement à chaque récurrence radar de chaque écho,
- traitement utilisant une suite de récurrences (ou équivalent),
- traitement particulier dans les radars de poursuite,
- traitement particulier dans les radars de cartographie de haute précision.

Les problèmes particuliers se rapportant aux : radars volumétriques, radars bi-statiques, missiles semi-actifs autoguidés, radars transhorizon, ne seront pas traités.

1 - DETECTION DE CHAQUE ECHO -

Différentes propriétés peuvent être utilisées pour trier les échos utiles du fond perturbateur : contraste de spectre, contraste temporel, meilleur pouvoir séparateur.

1.1. Contraste de spectre.

Au lieu d'amplifier linéairement avec la bande passante adaptée à l'écho à recevoir, en stabilisant le gain du récepteur à une valeur telle que le " bruit " total reste à une valeur convenable, il est plus intéressant d'utiliser un récepteur TFAC (à taux de fausse alarme constante). On perd un peu en sensibilité $\approx 0,5$ dB, par contre il est automatiquement adapté à toutes les situations. Figures n° 4 et 5.

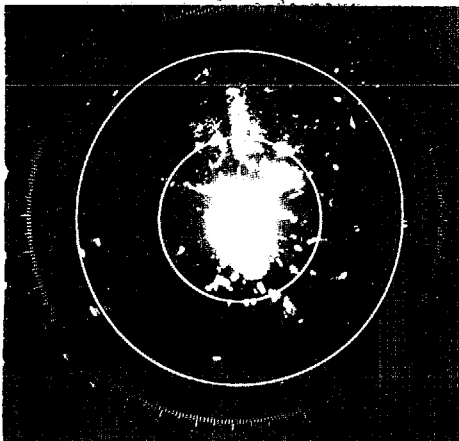


Fig. 4 - I.F avec nuages



Fig. 5

Il est composé d'un amplificateur limité à large bande B_1 suivi d'un filtre adapté au signal (bande B_0). Si on admet que les signaux perturbateurs, bruit, brouillage, échos diffus, etc ... ont un spectre beaucoup plus large que le signal utile, ils sont atténués de $\frac{B_0}{B_1}$ alors que le signal utile est conservé.

1.2. Contraste temporel.

Si l'écho utile est plus grand que les parasites, il suffit après avoir stabilisé le gain du récepteur de placer un ébasage pour le sélectionner. Malheureusement le niveau de perturbation est loin d'être constant dans toute la récurrence radar et le seuil doit être asservi (ou le gain modifié). Deux procédés sont utilisés : la réception non linéaire, le filtre transverse.

- Réception non linéaire.

Afin de mettre en évidence les échos ponctuels sur des fonds diffus et variables, la structure suivante est utilisée.

Un récepteur logarithmique de dynamique suffisante pour accepter toutes les fluctuations est suivi d'un différentiateur pour faire apparaître les échos ponctuels, puis un amplificateur expandeur recrée la dynamique aux signaux sélectionnés.

Figures n° 6 et 7.

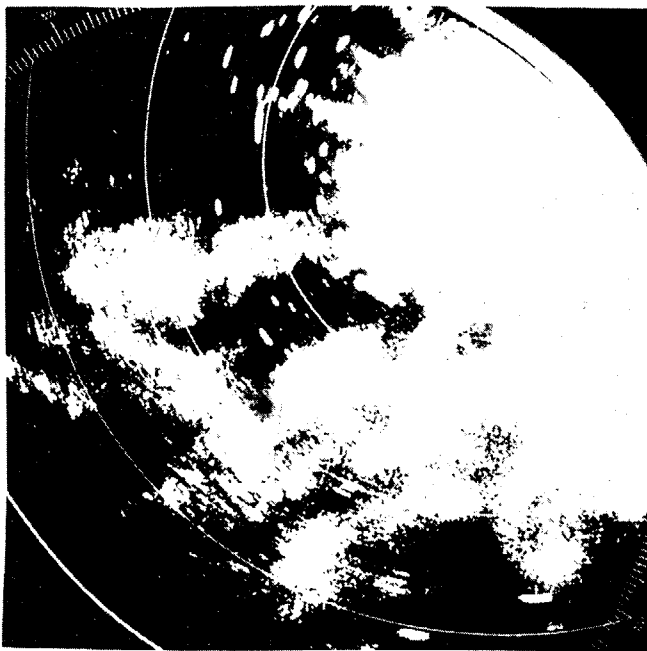


Fig. 6 - Rangées

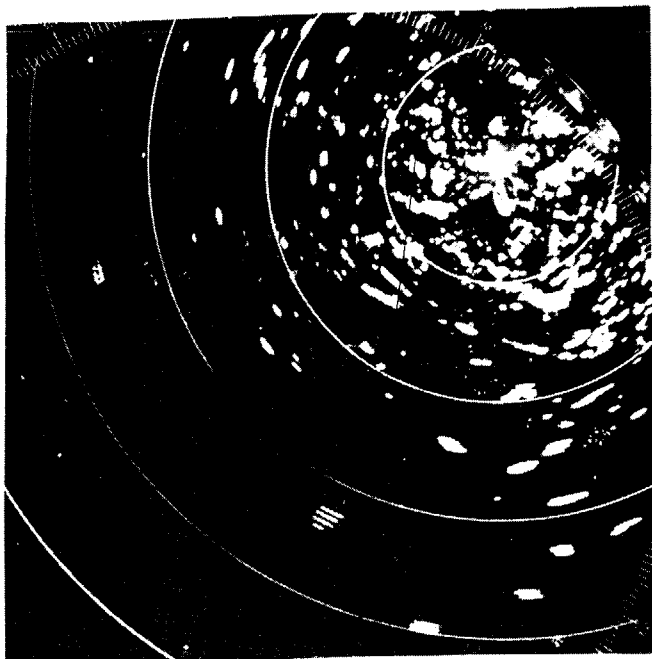


Fig. 7

- Filtre transverse.

Au lieu de comparer les échos à un seuil fixe, un détecteur de contraste les compare aux signaux apparaissant aux distances voisines. Ceci est réalisé par un sommateur qui prend la moyenne des n cases de distance voisines fournies par des prises sur une ligne à retard et donne le seuil au

au comparateur. Le nombre de cases de distance utiles est un compromis; si n est trop grand ce n'est plus le contraste local, s'il est trop petit il y a une fluctuation de seuil importante.

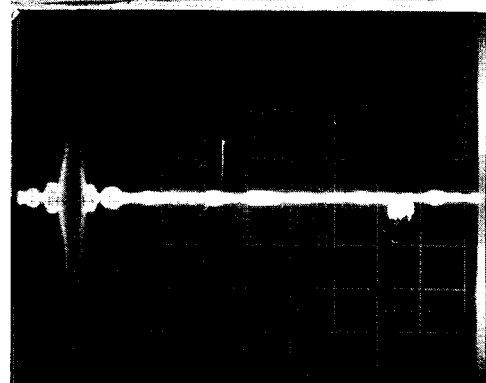
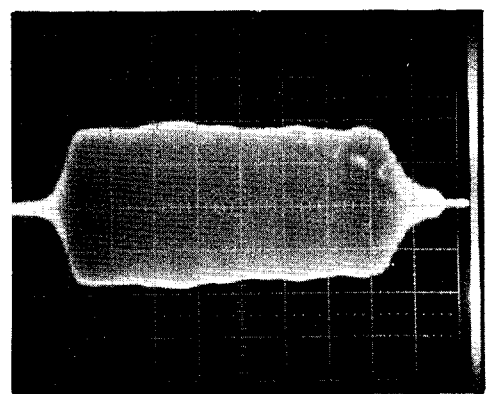
Nota : d'autres logiques que la simple sommation peuvent être utilisées et font l'objet de communications particulières.

1. 3. Amélioration du pouvoir séparateur.

Pour réduire la probabilité de confusion entre les signaux il est intéressant de réduire la durée de l'impulsion, mais à puissance moyenne constante, cela conduit à des puissances crêtes très importantes. D'autres solutions sont possibles pour conserver une impulsion de grande durée tout en lui donnant un spectre important (celui de l'impulsion fine), deux techniques sont utilisées : compression d'impulsion, codage de phase.

- Compression d'impulsion.

Les différentes fréquences du spectre sont émises successivement pendant la durée de l'impulsion. A la réception une remise en phase de ces composantes du spectre par une ligne dispersive (ou son équivalent) recrée l'impulsion fine. Figures n° 8 et 9.





Des précautions doivent être prises pour ne pas obtenir une impulsion avec des lobes secondaires en $\frac{\sinus x}{x}$. D'autre part un décalage dû à la fréquence Döppler fausse la distance (ceci n'est sensible que pour les impulsions longues et les buts rapides et ne concerne pratiquement que les radars anti ICBM, et de poursuite de satellites).

- Codage de phase.

L'impulsion émise est modulée en phase (système à 2 ou 4 phases) suivant un code pseudo aléatoire (en général Barker) à une fréquence égale au spectre désiré. A la réception un décodage permet de reconstituer l'impulsion fine. Il n'y a pas d'ambiguïté entre vitesse et distance comme en compression d'impulsion, par contre on peut être conduit à réaliser des filtres (décodage) adaptés aux différents Döppler.

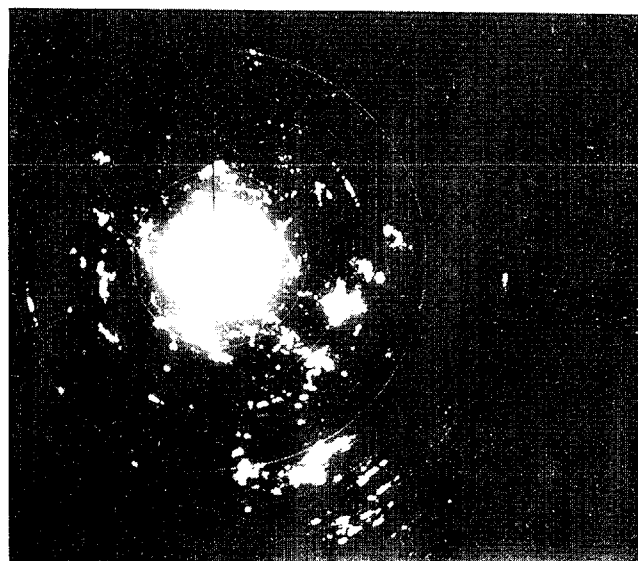
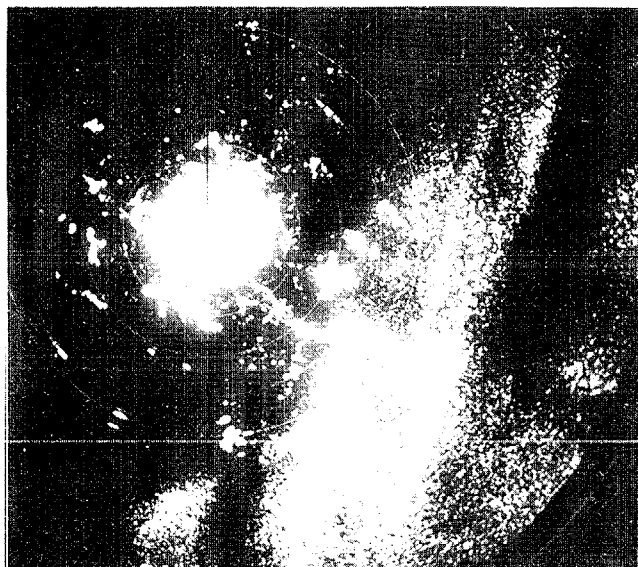
1.4. Sélection de polarisation.

Les obstacles petits devant la longueur d'onde réfléchissent les ondes sans modifier la polarisation. On met cette propriété à profit pour distinguer les échos utiles de la réflexion diffuse sur la pluie en émettant une onde en polarisation circulaire et en recevant suivant une polarisation circulaire orthogonale.

Ce procédé a des limites, en effet si λ est petit, les gouttes d'eau ne peuvent plus être considérées comme ponctuelles, leur forme en " assiette " intervient et la modification de polarisation diminue l'efficacité du procédé, qui passe de 30 à 40 dB pour $\lambda = 23$ cm, à 10-15 dB pour $\lambda = 1,8$ cm.

D'autre part les obstacles parfaitement symétriques, miroirs plans, sphères, obus vus de face, etc ..., même grands devant la longueur d'onde ne dépolarisent pas non plus et se trouvent donc éliminés.

Figures n° 10 et 11.



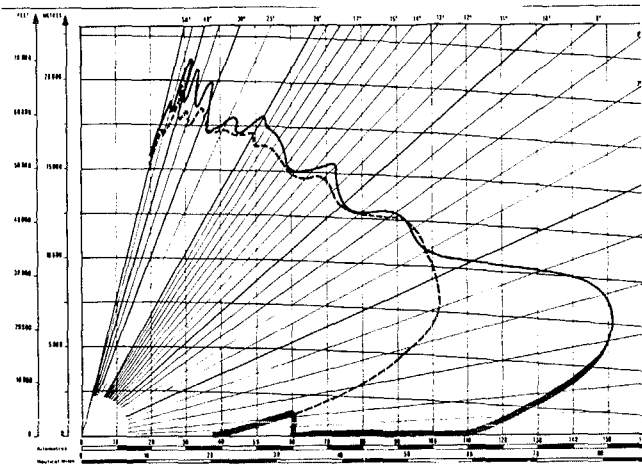
1.5. Sélection spatiale en site.

Si la directivité de l'antenne en site est certes un moyen pour réduire les échos fixes, l'atténuation naturelle à site nul (" chute au sol ") ne peut être très importante que si l'antenne est très grande et par conséquent la fréquence spatiale élevée.

Deux artifices peuvent être utilisés : la commutation de diagramme, la création d'un zéro dans la direction du sol.

- Commutation de diagramme.

A chaque récurrence radar on reçoit les échos successivement par deux antennes différentes, le diagramme supérieur est utilisé jusqu'à une certaine distance, puis le diagramme inférieur. On obtient ainsi un diagramme spatio-temporel optimisé. Figure n° 12.



- Création d'un zéro dans la direction du sol.

L'antenne fournit là aussi deux diagrammes, mais ils sont combinés en amplitude et en phase pour que le gain à un site donné soit nul. Le réglage peut être fait a priori : la direction du zéro est fixe, ou bien peut être asservie aux échos de sol successifs. On voit sur les figures n° 13, 14 et 15 l'atténuation supplémentaire par rapport à la couverture haute.

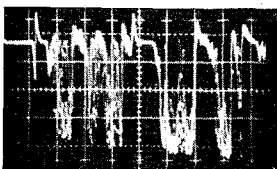


Fig. 13 Couverture haute normale

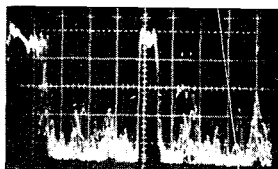


Fig. 14 - Couverture haute atténuée de 10 dB

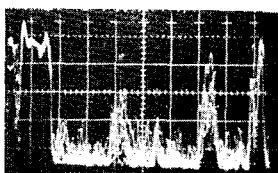


Fig. 15 - Couverture haute avec "zéro fixe"

1. 6. Suppression des lobes secondaires (SLS)

Ce terme est impropre, il serait en effet trop beau de pouvoir supprimer les lobes secondaires d'une antenne aussi facilement. En réalité on se contente de recevoir sur une antenne omnidirectionnelle en gisement ayant un gain (réel ou équivalent) supérieur à celui des lobes secondaires de l'antenne principale. Lorsque les signaux ainsi captés sont supérieurs à ceux reçus dans l'antenne principale on en déduit qu'ils sont dans les lobes secondaires et on les supprime (écho par écho).

2 - TRAITEMENT DES RECURRENCES SUCCESSIVES -

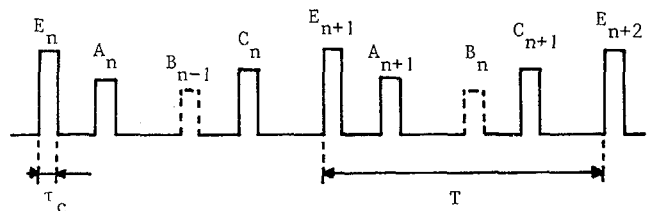
2. 1. Effet Döppler.

Tout objet mobile, radialement par rapport au radar, renvoie un écho décalé en fréquence de $\frac{2V}{\lambda}$. Cette propriété peut être mise en évidence pour trier les échos fixes. Bien entendu si le radar est lui-même mobile, tous les buts ont un effet Döppler, mais les objectifs eux-mêmes mobiles ont un effet différentiel par rapport aux échos de sol qui peut être mis en évidence.

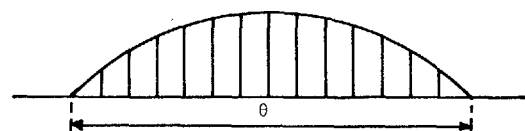
2. 1. 1. Spectre émis et ambiguïtés.

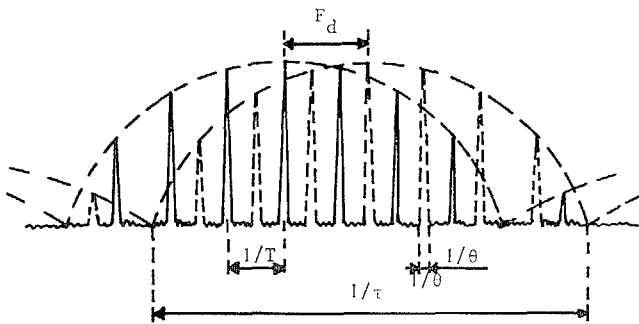
Lorsqu'un radar émet des impulsions de durée τ avec une période de répétition T et reçoit des échos d'un but (temps de passage du faisceau) pendant un temps θ , le spectre d'un écho fixe est donné, si le but est mobile le spectre est déplacé par effet Döppler $F_d = \frac{2V_r}{\lambda}$. On voit que les spectres s'imbriquent et qu'il y a ambiguïtés.

Figure n° 16.



E : émission ; A, B, C, échos
 τ : durée de l'impulsion émise
 T : période de récurrence
 θ : durée du passage du faisceau d'antenne





— spectre d'un écho fixe
 ---- spectre d'un mobile

De même les échos des buts reviennent après un temps $t = \frac{2D}{C}$ ($D =$ distance, $C =$ vitesse de la lumière) si celui-ci est supérieur à T période de récurrence il y a ambiguïtés en distance.

Plusieurs cas d'ambiguïtés sont possibles.

a) radar à basse fréquence de récurrence (BFR)

$t < T$. C'est le cas des radars classiques de veille. En général la fréquence Döppler est supérieure à celle de récurrence $\frac{1}{\theta} > F_d > \frac{1}{T}$ il y a ambiguïtés et les buts mobiles à une certaine vitesse sont confondus avec les échos fixes (vitesse aveugle).

Figures n° 17 et 18.

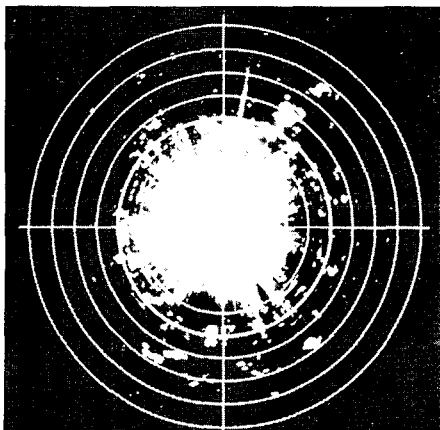


Fig. 17
Vidéo normale

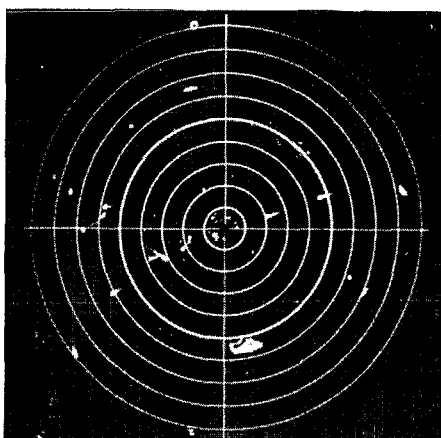


Fig. 18
Vidéo MTI

- b) Radar à haute fréquence de récurrence (HFR)
 $F_d < \frac{1}{T}$ il n'y a pas d'ambiguïté vitesse, mais en général il y en a sur la distance et contamination des échos lointains par les échos parasites proches (distances aveugles).
- c) Radar à moyenne fréquence de récurrence. Ils ont des ambiguïtés en distance et en vitesse, mais peu, et une modulation de T (ou un choix judicieux dans le cas de la poursuite) suivie d'un traitement " sophistiqué " permet de tout reconstituer.
- d) Radar à onde continue CW : ils ne sont en général utilisés qu'en poursuite, seule la sélectivité en fréquence permet de sélectionner les buts.

2.1.2. Levée d'ambiguïtés.

On peut lever les ambiguïtés (mais non la contamination) en utilisant le radar suivant deux modes (ou plus) successifs :

- bi-pulse dans le cas BFR pour obtenir la vitesse exacte,
- bi-récurrence dans le cas HFR pour obtenir la distance exacte. On peut également utiliser plusieurs longueurs d'onde.

2.2. Extracteurs -

Ils utilisent les autres caractéristiques connues des échos successifs sur un but ponctuel.



2.2.1. Contraste en surface.

C'est l'équivalent en surface du détecteur de contraste (filtre transverse) de 1.2. Pour cela on quantifie et met en mémoire le niveau dans chaque case de distance et d'azimut, puis on compare chacune d'elle à l'environnement. Ceci permet d'asservir le seuil de détection à la valeur moyenne des perturbations résiduelles dans la région du but utile.

2.2.2. Critère de vraisemblance.

Le diagramme de l'antenne définit l'enveloppe des échos successifs de chaque but. A l'aide d'un filtre adapté on peut sélectionner les échos des buts ponctuels de ceux provenant d'obstacles diffus, anges ou multiples.

On peut, plus simplement, compter le nombre d'échos successifs reçus, ou tout autre critère, celui le plus couramment utilisé est : recevoir dans chaque case de distance N fois de suite une probabilité de détection K .

On détermine ainsi un plot au baricentre des échos successifs d'un même but.

2.3. Elaboration de piste.

En comparant les plots successifs de tour d'antenne à tour d'antenne et en les associant au mieux on détermine leur vitesse, et on peut ainsi ne conserver que ceux correspondant à des objectifs vraisemblables, en éliminant :

- . ceux qui ne se déplacent pas ou peu (buts fixes)
- . ceux qui ne se répètent pas ou corrélent mal (parasites)
- . ceux qui ont une trajectoire invraisemblable : accélérations trop importantes (résidus de parasites et mauvaises associations).

3 - CAS PARTICULIER DES RADARS DE POURSUITE -

En plus des traitements précédents, on peut utiliser le fait que l'on dispose d'un temps plus important et de plus d'informations pour mieux adapter le radar à l'environnement.

3.1. Recherche de λ optimum pour maximiser la surface équivalente du but (ou plus exactement le contraste) puis poursuite avec la meilleure fréquence trouvée.

3.2. Recherche de la période de répétition (T) optimale pour minimiser les ambiguïtés distance et vitesse aux environs de celles du but poursuivi.

3.3. Réduction de la cellule de résolution après l'accrochage afin de discriminer les parasites et en particulier les leurres actifs ou passifs. Cette cellule est réduite non seulement en distance par codage, et vitesse par filtrage Döppler, mais également en lissant la trajectoire du but et en limitant ses évolutions à des valeurs vraisemblables.

3.4. Diagrammes d'antenne (antenne adaptative). Dans les antennes à balayage électronique (ou disposant au minimum de sources multiples) on peut annuler le gain dans les directions d'où viennent les signaux parasites tout en maintenant le pointage sur le but.

4 - RADAR A ANTENNE SYNTHETIQUE -

C'est un cas très particulier qui est donné à titre d'exemple des traitements de signal permettant une excellente définition avec un radar émettant des impulsions de l'ordre de la μs , mais comprimée, dans une antenne de l'ordre du mètre mais se déplaçant avec l'avion.



TRAITEMENT DU SIGNAL RADAR

L'utilisation de tous les échos de chaque but pendant tout le passage du faisceau permet de synthétiser une focalisation dynamique de l'antenne équivalente et ceci pour toutes les distances.

Deux types de traitement peuvent être utilisés :

- optique : il reproduit à l'échelle lumineuse la géométrie de la détection radar pendant le passage du faisceau,
- numérique : toutes les récurrences radar sont mises en mémoire, puis chaque tranche de distance est traitée par un filtre numérique correspondant à la loi de phase à cette distance.

Figure n° 19.

