

## CARTOGRAPHIE DOPPLER ET DÉTECTION DE CIBLES RADAR

C. Bérenguer\* , A. Ferrari\* , L. Martinet†

\* Laboratoire d'Informatique, Signaux & Systèmes - URA CNRS 1376  
 Université de Nice-Sophia Antipolis - 41, Bd Napoléon III - 06041 NICE cedex

† CTSN/LSA - DCN - B.P.28 - 83800 TOULON NAVAL

### RÉSUMÉ

Le contrôle du taux de fausse alarme pour la détection de cibles radar s'avère très important pour le bon fonctionnement de la chaîne de traitement. Une procédure de détection s'appuyant sur une première étape de "cartographie Doppler" (intégration cohérente) est présentée dans cet article. Le premier volet de la détection est effectué sur l'amplitude du signal sinusoïdal de l'écho de cible par un détecteur paramétrique TFAC en distance. Dans le but de réduire le taux de fausse alarme, les cibles potentielles sont ensuite confirmées ou infirmées par un test de consistance appliqué à plusieurs estimées de la fréquence Doppler de la cible sur une rafale. Les performances de la méthode sont illustrées à partir de simulations et il est proposé de présenter les résultats de la détection sous forme d'une carte Doppler non ambiguë.

### 1. INTRODUCTION ET PRÉSENTATION DU PROBLÈME

Les tâches principales des systèmes de surveillance radar sont la détection, la localisation et la visualisation des cibles mobiles dans l'espace d'observation (azimut, distance). En pratique, aux signaux des cibles viennent se superposer un bruit blanc gaussien (d'origine thermique) et le fouillis radar (constitué d'échos parasites provenant du sol, de la mer, des nuages, ...) qui peuvent perturber gravement les procédures de détection de cibles. Ainsi, l'utilisation d'un seuil de détection fixe conduit à un nombre important de détections. Or, il est primordial d'assurer un taux de fausse alarme faible de façon à ne pas surcharger les processeurs d'initialisation et de suivi de pistes situés plus en aval dans la chaîne de traitement des signaux radar, sous peine de voir leurs performances se détériorer considérablement.

Plusieurs méthodes existent pour contrôler le taux de fausse alarme, parmi lesquelles l'utilisation de seuils adaptatifs, de détecteurs non paramétriques ou de cartes de fouillis de référence. Mais ces procédures, largement détaillées dans la littérature, ne prennent bien souvent en compte que le niveau d'énergie dans une cellule de résolution du radar pour la comparer à son voisinage. La connaissance a priori de la nature sinusoïdale (effet Doppler) des échos de cibles mobiles n'est pas toujours utilisée dans le schéma de détection [4]. Afin d'exploiter cette information, on peut concevoir un détecteur qui opère sur l'énergie associée à une fréquence

### ABSTRACT

Radar systems need a low false alarm rate during targets detection procedure in order to achieve good operating performances. A detection scheme, based on a first step of "Doppler cartography" (coherent integration), is discussed in this paper. Target candidates are first labeled using a range CFAR parametric thresholding on amplitudes of the sinusoidal target echoes. In order to lower the false alarm rate, the detection is then confirmed using a consistency test applied to several estimates of the Doppler frequency within a burst. The method performances are illustrated by simulations and the results of the detection are finally presented on a non-ambiguous Doppler map.

Doppler et utilise l'information fréquentielle de l'écho pour conclure sur la présence d'une cible mobile. Cette communication présente une méthode de détection de cibles qui tient compte de ces données en agissant sur le signal radar mis en forme lors d'une étape préalable de cartographie Doppler. Les résultats de la détection sont finalement présentés sous forme d'une carte Doppler non ambiguë.

### 2. LE SIGNAL RADAR

Le signal étudié est supposé issu d'un radar Doppler cohérent à impulsions. Les récurrences sont regroupées en blocs (ou rafales) de longueur  $N_p$  ( $\approx 10$ ). La fréquence de récurrence des impulsions ( $F_r$ ), constante sur chaque bloc, varie d'une rafale à l'autre. Sur un bloc, et à case distance fixée, le signal en sortie du démodulateur amplitude-phase s'exprime :

$$x(k) = \underbrace{A(k) \exp(j2\pi f_d \frac{k}{F_r})}_{\text{si cible}} + \underbrace{c(k)}_{\text{fouillis}} + \underbrace{b(k)}_{\text{bruit blanc}} \quad (1)$$

pour  $k = 0, \dots, N_p - 1$ . La fréquence  $f_d$ , résultant de l'effet Doppler, correspond à la vitesse radiale de la cible. La variation de l'amplitude de l'écho de cible d'un échantillon à l'autre est due à la modulation gaussienne introduite par le lobe d'antenne et à une éventuelle fluctuation de la surface équivalente radar de la cible. Le signal de cible apparaît généralement sur plusieurs blocs contigus. On supposera

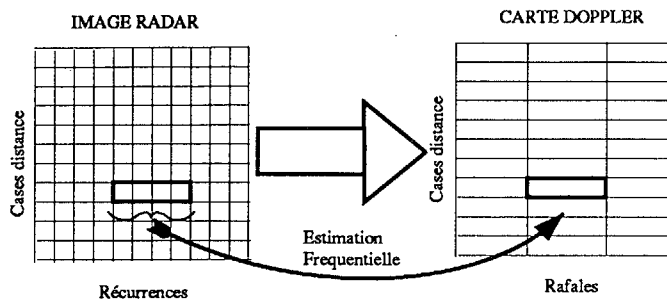


Figure 1: Principe de passage du signal radar à la carte Doppler.

dans la suite que le signal reçu est passé dans un filtre de réjection (filtre à simple annulation, filtre propre, filtre d'erreur de prédiction linéaire transversal ou en treillis) de façon à atténuer le fouillis. Les échantillons non valides (réponse transitoire du filtre) sont éliminés le cas échéant en sortie du filtre. Le fouillis est supposé gaussien (contribution de nombreux réflecteurs élémentaires) complexe coloré (processus autorégressif, [10]) et le résidu, en sortie du filtre, gaussien et blanchi.

### 3. CARTOGRAPHIE DOPPLER

On se propose de dresser une carte Doppler de l'espace d'observation en groupant les récurrences en rafales et en associant à chaque cellule (rafale, distance), ou encore (azimut, distance), une fréquence Doppler ( $\hat{f}_d$ ) et une amplitude ( $\hat{A}$ ), voir figure (1).

La fréquence est estimée par maximum de vraisemblance sur les  $N_p$  points de chaque bloc. Dans le cas d'une sinusoïde unique, l'estimée  $\hat{f}_d$  par maximum de vraisemblance est obtenue à partir du périodogramme [1] :

$$\hat{f}_d = \arg \max_f \left( \frac{1}{N_p} \left| \sum_{k=0}^{N_p-1} x(k) \exp(-j2\pi \frac{f}{F_r} k) \right|^2 \right) \quad (2)$$

Cette solution optimale a de plus l'avantage de l'efficacité puisqu'elle peut être implantée à partir de transformées de Fourier rapides.

L'amplitude associée  $\hat{A}$  est ensuite estimée par moindres carrés (ou par maximum de vraisemblance) à partir de  $\hat{f}_d$  par :

$$\hat{A} = \frac{1}{N_p} \left| \sum_{k=0}^{N_p-1} x(k) \exp(-j2\pi \frac{\hat{f}_d}{F_r} k) \right| \quad (3)$$

La carte des amplitudes ainsi établie offre une meilleure mise en forme de l'information (lissage et mise en relation de l'énergie à une fréquence Doppler) et effectue un filtrage du bruit. Cette étape de cartographie Doppler est en fait analogue à une intégration cohérente bloc par bloc des signaux qui améliore d'un facteur  $N_p$  le rapport signal à bruit et qui évite les pertes dues à l'intégration non cohérente, [2]. Un exemple de passage de l'enregistrement radar à la carte des amplitudes est donné dans la figure (4,a,b). La carte des amplitudes ainsi établie se prête alors bien à la détection des cibles.

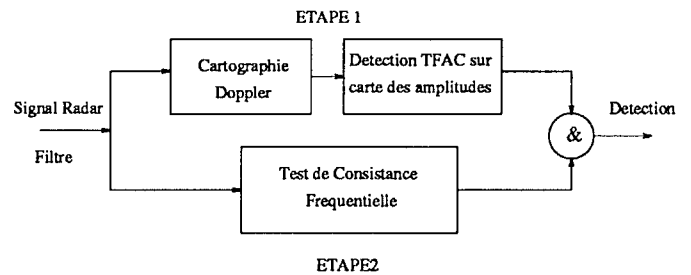


Figure 2: Schéma bloc de la procédure de détection. En pratique, les deux opérations sont réalisées séquentiellement.

## 4. DÉTECTION DES CIBLES

La procédure de détection retenue comprend alors deux volets : la détection est d'abord réalisée sur la carte des amplitudes, puis confirmée en revenant à l'information fréquentielle du signal brut, voir figure (2)

### 4.1. Détection sur la carte des amplitudes

La première phase du schéma de détection consiste à réaliser un marquage des cibles potentielles sur la carte des amplitudes, voir figure (4,c).

#### 4.1.1. Principe

Dans ce but, on effectue un seuillage adaptatif paramétrique à Taux de Fausse Alarme Constant (TFAC) le long des cases distance [3]. Plusieurs méthodes de détection TFAC paramétrique ont été proposées ; elles obéissent toutes au même schéma général présenté dans la figure (3). Pour chaque cellule à tester  $Y$ , on considère une fenêtre de  $2n$  cellules de référence situées de part et d'autre de  $Y$ . Les variables aléatoires  $X_1, \dots, X_{2n}$  sont supposées indépendantes et identiquement distribuées. Le rôle du processeur TFAC est d'estimer à partir des cellules de références la "puissance" locale du fouillis (il s'agit en fait d'un paramètre caractérisant la loi suivie par les échantillons du fouillis). La différence entre les diverses procédures de seuillage paramétrique TFAC réside dans la méthode retenue pour effectuer cette estimation (moyennage, statistiques d'ordre, ...). Le choix du processeur TFAC affecte les performances du détecteur (robustesse au bruit, masquage de cibles voisines, bords de fouillis) : dans cet article, nous nous limiterons au processeur à moyennage (CA-CFAR) même si ses performances sont moindres que celles des processeurs à statistiques d'ordre.

La constante de seuillage  $T$  est ensuite calculée en tenant compte de la densité de probabilité du fouillis de manière à assurer une probabilité de fausse alarme voulue, d'après l'équation(4) :

$$P_{fa} = E_Z \left[ \int_{TZ}^{+\infty} p(y|H_0) dy \right] \quad (4)$$

Sous l'hypothèse  $H_0$  (absence de cible), les amplitudes estimées suivent une loi gaussienne (d'après (3)), ce qui donne une loi exponentielle  $p(y|H_0) = \frac{1}{\mu} \exp(-\frac{y}{\mu})$  après détection d'enveloppe quadratique. On montre [5] que  $T$  est alors

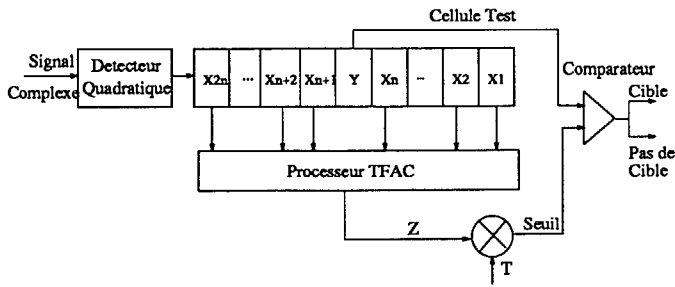


Figure 3: Schéma général du détecteur paramétrique à Taux de Fausse Alarme Constant.

donnée par :

$$T = P_{fa}^{-1/2n} - 1 \quad (5)$$

Les performances de ce type de détecteur s'améliorent lorsqu'on autorise une  $P_{fa}$  plus élevée. L'intérêt de la procédure de détection présentée ici est donc de tolérer dans un premier temps une  $P_{fa}$  élevée pour améliorer les qualités de détection, et de se ramener ensuite à la  $P_{fa}$  désirée par le biais de la confirmation fréquentielle sur les cibles potentielles.

#### 4.1.2. Simulations

Des simulations ont été réalisées afin de présenter des courbes COR du détecteur après cartographie, voir figure (5). Les  $P_{fa}$  choisies ( $\approx 10^{-2}$ ) sont plus élevées que dans la réalité ( $\approx 10^{-6}$ ), de façon à ne pas utiliser des procédures de simulations faisant appel à l'"importance sampling" [6] pour l'étude des probabilités très faibles. Le critère d'évaluation des performances retenu est le seuil de décision moyenne ( $SDM$ ), i.e. la valeur du  $RSB$  pour laquelle on a une probabilité de détection  $P_d = 0,5$ . La cartographie permet d'améliorer les performances en détection par rapport à l'intégration non cohérente. Pour des  $P_{fa}$  croissantes, on constate un abaissement du  $SDM$ .

#### 4.2. Confirmation fréquentielle

Pour chaque cellule (rafale, distance) retenue à l'étape précédente, la détection est confirmée ou infirmée à partir de la consistance de l'estimation fréquentielle sur la rafale, voir figure (4,d).

##### 4.2.1. Principe

Plusieurs estimations  $\hat{f}_{dk}$ ,  $k = 1, \dots, m$  de la fréquence Doppler sont réalisées en plusieurs zones de  $N$  points sur la rafale. Ces estimées sont obtenues à partir d'un très petit nombre de points par des algorithmes de type moindres carrés ou moindres carrés totaux contraints, [9]. On choisit une structure d'estimation qui évite le balayage fréquentiel systématique pour la détermination d'un maximum. La consistance fréquentielle est ensuite testée en calculant la covariance des estimées et en la comparant à un seuil. Il est alors possible de réutiliser  $\hat{f}_d$  comme moyenne des estimées lors du calcul de la covariance. Afin de rendre le seuillage adaptatif, la valeur du seuil peut être calculée en

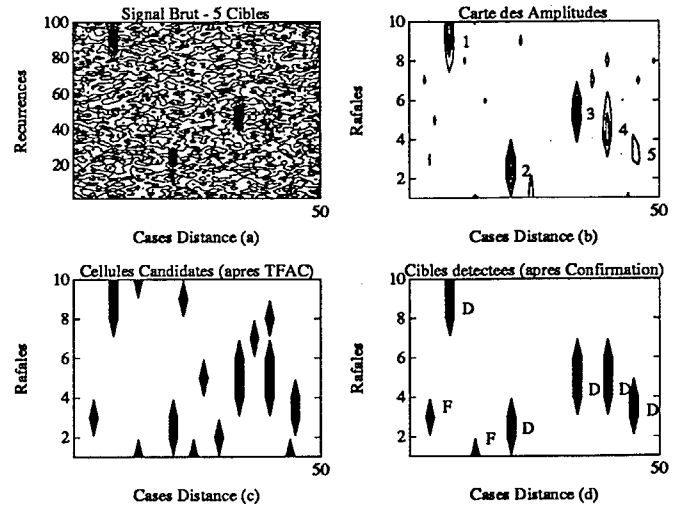


Figure 4: Exemple de détection sur un signal radar simulé - 5 échos - Rafales de 10 récurrences - 50 cases distance - (d) D=Bonne Détection, F=Fausse Alarme.

$RSB$ (dB)	5	10	20	30
Rapport $R$	1,07	1,08	1,04	0,99

Tableau 1: Evolution de  $R$  en fonction du  $RSB$

fonction de la borne de Cramer-Rao ( $CRB$ ) sur la variance de l'estimation de la fréquence d'une sinusoïde :

$$CRB = \frac{6\sigma^2}{\hat{A}^2 N(N^2 - 1)(2\pi)^2} \quad (6)$$

Des simulations montrent que le rapport  $R$  (covariance des estimées /  $CRB$ ) reste quasiment constant en fonction du rapport signal à bruit ( $RSB$ ) dans la zone où l'estimation n'est pas aberrante (tableau 1). Pour chaque cible à confirmer, il suffit donc d'évaluer localement le  $RSB$  et de calculer le seuil de confirmation par  $S.CRB$ , où  $S$  est une constante à déterminer en fonction de la  $P_{fc}$  (probabilité de fausse confirmation) voulue. Le critère de confirmation est alors :

$$\text{Cible présente si : } \text{cov}(\hat{F}_D) \leq S.CRB \quad (7)$$

où  $\hat{F}_D$  est le vecteur des estimées. La variance du bruit ( $\sigma^2$ ) nécessaire au calcul du seuil étant inconnue, elle peut être estimée à partir de l'amplitude  $\hat{A}$  sur une case distance voisine (supposée sans cible) de la case en cours d'examen par la relation, validée par simulation :

$$\hat{\sigma}^2 = (2.\hat{A})^2 \quad (8)$$

Cette solution a l'avantage de permettre une estimation adaptative du seuil à partir des résultats de la cartographie Doppler, sans avoir à revenir au signal brut.

##### 4.2.2. Simulations

Des simulations ont été réalisées pour présenter l'évolution de la  $P_{fc}$  (probabilité de fausse confirmation fréquentielle) en fonction de  $S$  et la réduction du taux de fausse alarme obtenu grâce à l'étape de confirmation. La figure (6,a) montre

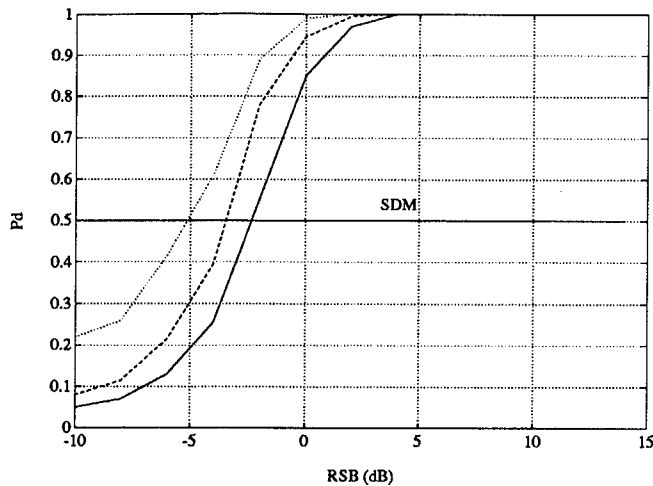


Figure 5: Caractéristiques opérationnelles du détecteur. 500 réalisations par  $RSB$  envisagé, 15 points par rafale, 100 cases distance. (-) : intégration non cohérente; (- -) : cartographie Doppler ( $P_{fa} = 10^{-2}$ ); (..) : cartographie Doppler ( $P_{fa} = 10^{-1}$ ); SDM : seuil de détection moyenne.

que la confirmation fréquentielle peut permettre d'améliorer la  $P_{fa}$  totale d'un facteur supérieur à 10. L'amélioration apparaît néanmoins très sensible à la valeur du seuil. Le choix de  $S$  et l'estimation du  $RSB$  pour le calcul du seuil modifient sensiblement les performances de la confirmation. La courbe (6,b) présente des courbes de  $P_d$  en fonction du  $RSB$  avant et après confirmation pour deux valeurs de  $S$ . Une valeur élevée de  $S$  ( $S = 3$ ) permet de ne pas trop altérer les qualités de détection ( $SDM$  inchangé) mais offre un gain mineur en terme de  $P_{fa}$ . En revanche, une valeur plus faible ( $S = 1,5$ ) assure une meilleure  $P_{fa}$  globale mais dégrade le  $SDM$  et limite les performances de détection même à haut rapport signal à bruit. Ce compromis "classique" entre  $P_{fa}$  et  $P_d$  peut être en partie contourné en rendant la procédure de confirmation plus sélective. Il est par exemple possible d'augmenter le nombre d'estimées dans le vecteur  $\hat{F}_D$  (afin d'en diminuer la variance en présence d'une cible), ou encore d'utiliser la présence de l'écho sur plusieurs blocs pour tester la consistance fréquentielle sur des rafales consécutives. On notera enfin que la  $P_{fa}$  globale est maintenue indépendante du  $RSB$  et constante par la procédure de confirmation.

##### 5. CONSTRUCTION DE LA CARTE DOPPLER NON AMBIGUË

L'échantillonnage des échos de cibles varie avec les blocs. Il est donc possible pour chaque cible détectée d'estimer la fréquence Doppler non ambiguë par la transformation de Dirichlet [8], ou si le mode d'échantillonnage s'y prête par une méthode présentée à ce colloque [7] et de présenter les résultats sous forme d'une carte sur laquelle la brillance des points est proportionnelle à la vitesse radiale réelle de la cible. Ce mode de représentation peut venir en complément d'une représentation, plus classique, proportionnelle à l'énergie de l'écho des cibles.

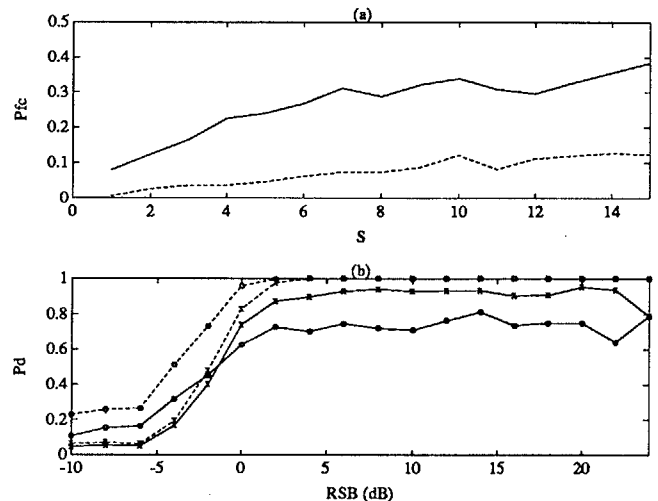


Figure 6: (a) Evolution de la  $P_{fc}$  en fonction de  $S$ ; 3 estimées sur 8 points par rafale; (-) :  $RSB = 0dB$ , (- -) :  $RSB = 10dB$ . (b) Modification de la  $P_d$  après confirmation fréquentielle; (- -) : avant conf.; (-) : après conf.;  $\times$  :  $S = 1.5$ ;  $P_{fa}$  avant conf.:0.012,  $P_{fa}$  après conf.:0.003;  $\circ$  :  $S = 3$ ;  $P_{fa}$  avant conf.:0.12,  $P_{fa}$  après conf.:0.015. 500 réalisations par  $RSB$  ou valeur de  $S$ ; longueur de rafale de 12 points.

##### 6. RÉFÉRENCES

- [1] S. Kay. *Modern Spectral Estimation*. Signal Processing Series. Prentice Hall. 1987
- [2] S. Skolnik. *Introduction to Radar Systems*. Electrical Engineering Series. Mc Graw Hill. 1980
- [3] A. Farina, and F.A. Studer. A Review of CFAR Detection Techniques in Radar Systems. *Microwave Journal*, pages 115-128, Sept. 1986
- [4] G.V. Trunk, W.B. Gordon, and B.H. Cantrell. False Alarm Control Using Doppler Estimation. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 26(1):146-153, January 1990.
- [5] P.P. Gandhi, and S.A. Kassam. Analysis of CFAR Processors in Nonhomogeneous Background. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 24(4):427-445, July 1988.
- [6] R.L. Mitchell. Importance Sampling Applied to False Alarm Rate Statistics. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 17(1):15-24, January 1981.
- [7] A. Ferrari, C. Bérenguer, and M. Artaud. Estimation Doppler Radar Non Ambiguë. In *Actes du Quatorzième Colloque sur le Traitement du Signal et des Images, GRETSI*, 1993.
- [8] A. Wojtkiewicz, and M. Tuszynski. Application of the Dirichlet Transform in Analysis of Nonuniformly Sampled Signals. In *ICASSP-92*, pages V-25-V-28, 1992.
- [9] A. Ferrari, J. Ménez, and G. Alengrin. A Single Frequency Efficient Estimator. *Electronics Letters*, 27(21):1939-1941, October 1991.
- [10] S. Haykin, B.W. Currie, and S. Kesler. Maximum-Entropy Spectral Analysis of Radar Clutter. *Proceedings of the IEEE*, 70(9):953-962, Sept. 1982.