

# Les Techniques d'intégration longue en traitement des données radar

Frédéric BARBARESCO, Fabienne LANCON, Roch SETTINERI

THALES AIR DEFENCE, Unité de Développement Radar, Filière Algorithmes et Etudes Fonctionnelles

7/9, rue des Mathurins, F-92223 Bagneux Cedex, France

{frederic.barabaresco, fabienne.lancon, roch.settineri}@fr.thalesgroup.com

**Résumé** - Nous traitons du problème de l'intégration longue pour la détection de cible mobile dans le contexte applicatif radar, à partir de données non-cohérentes et cohérentes en Doppler. Nous présentons les résultats de plusieurs techniques d'intégration longue qui sont considérées comme des extensions de filtre adapté classique. Nous étendons également la transformée de Radon au cas Doppler. Nous avons mis en œuvre et testé, en terme de performance, différentes classes d'algorithmes d'intégration longue. Pour chaque méthode, nous donnons les avantages et les inconvénients de leur emploi dans le cadre applicatif radar.

**Abstract** – *This paper deals with long term integration & track-before-detect methods for moving target radar detection from non-coherent and coherent Doppler data. We present different kinds of long term integration approaches based on classical matched filter extension principle but also Radon transform extended to Doppler filter data processing. We have developed and evaluated figures of merits of these algorithms. For each approach, we provide pro and cons for their use in a radar application framework.*

## 1. Introduction

Une chaîne radar classique est constituée de traitements séparables en distance, Doppler et éventuellement angle, chacun permettant de mesurer les informations relatives à la distance radar-cible, la vitesse radiale et la direction d'arrivée de la cible. Ces traitements sont mis en œuvre en supposant qu'à l'échelle de la durée d'observation (quelques ms à quelques dizaines de ms), la cible n'a pas significativement bougé dans l'espace des paramètres (distance, Doppler, angle), relativement aux résolutions selon chacun de ces axes. Par ailleurs, la probabilité de détection d'une cible ainsi que les précisions d'estimation de ses paramètres sont proportionnelles à sa durée d'observation. Si l'on souhaite augmenter les performances des radars actuels sans modifier leurs architectures matérielles (puissance d'émission, antenne, ...), il est nécessaire de recourir à des *traitements d'intégration longue* qui consistent à faire intervenir explicitement la cinématique de la cible, de façon à réaliser une intégration – cohérente ou incohérente - du signal reçu le long de la trajectoire de cette dernière.

L'objet de cet article est de présenter 3 techniques d'intégration longue étudiées ces dernières années à THALES Air Defence (anciennement Thomson-CSF Airsys). Le chapitre 2 est consacré à la formulation du problème d'intégration longue. Le chapitre 3 présente une application au cas d'un radar à antenne tournante, en présence de cibles hypervéloces. Le chapitre 4 présente une application relative à un radar à formation de faisceaux par le calcul (FFC). Enfin, le chapitre 5 est une implémentation du filtre adapté, à faible coût calculatoire, sous forme d'une transformée de Radon ou Hough Doppler, prenant en compte l'information de sorties des bancs de filtres Doppler.

## 2. L'intégration longue vue comme un filtre adapté

Un radar émet classiquement une séquence d'impulsions (rafale) qui sont réfléchies par la cible avant d'être reçues par le radar. Après passage dans divers étages analogiques, le signal reçu est démodulé et numérisé à une cadence inverse de la bande du radar. Le traitement du signal radar est constitué de 3 filtres adaptés séparables (distance, Doppler, angle), dont l'optimalité n'est garantie que si la cible ne change pas de cellule de résolution radar pendant la durée de mise en œuvre de ce dernier. Dans le cas contraire, la cible « migre » en distance et/ou en Doppler et/ou en angle et il en résulte une dégradation des performances en détection et en localisation de la cible.

Les techniques d'intégration longue s'expriment sous forme d'un filtre adapté dépendant non pas des paramètres mesurés classiquement par un radar (distance, Doppler et angle), mais par les paramètres cinématiques de la cible, supposée obéir à un certain modèle d'évolution (mouvement rectiligne uniforme MRU par exemple). Ainsi, en intégration longue, les hypothèses testées sont des hypothèses de trajectoires de cibles et non plus des hypothèses de distance, Doppler, angle. L'intérêt d'une telle paramétrisation est de permettre l'intégration du signal reçu le long des hypothèses de trajectoires de la cible et par conséquent d'améliorer la probabilité de détection et les précisions d'estimations.

## 3. Application à un radar à antenne tournante

Nous nous placerons dans le cas d'un radar à antenne tournante, permettant d'obtenir une durée d'observation de la cible dans le passage d'antenne de l'ordre de 40 ms. La durée d'intégration cohérente est de 5 ms et la fréquence de répétition des impulsions est de 5000 Hz. La bande

instantanée du radar est de 6 MHz. La cible est supposée suivre un MRU à une vitesse maximale de 1000 m/s. Par ailleurs, elle est perturbée par du fouillis de mer, qui est un écho parasite à spectre large centré autour de zéro.

Dans cette application, la technique d'intégration longue est mise en œuvre après pré-traitements radar classique (filtres adaptés en distance et en Doppler). La vitesse maximale de la cible est telle qu'aucune migration distance ou Doppler n'a lieu pendant la durée d'intégration cohérente. Par contre, la cible peut migrer en distance (d'au plus 2 à 3 cases distance) et beaucoup plus significativement en Doppler (5 à 15 bins), pendant la durée d'observation. Ceci signifie que l'intégration longue consistera en une intégration incohérente des cellules de résolution distance/Doppler issues des différentes rafales émises pendant le passage du lobe d'antenne sur la cible.

La mise en œuvre pratique consiste dans un premier temps à réaliser une pré-détection à seuil bas, de façon à limiter le nombre d'hypothèses de trajectoire. La seconde étape consiste à traduire les hypothèses cinématiques (MRU) en hypothèses de cellules distance/Doppler. La dernière étape consiste à intégrer de manière incohérente le signal issu des cases distance/Doppler et à décider d'une détection si ce dernier dépasse le seuil de détection.

La figure suivante fournit un résultat de simulation pour une cible en trajectoire tangentielle, volant à 1000 m/s et à une distance de 5.2 km du radar. Le nombre de rafales disponibles pendant la durée d'observation est de 10. La cible ne migre pas en distance, mais s'étend sur 4 bins Doppler au cours de son évolution pendant la durée de passage dans le lobe d'antenne. De plus elle traverse une zone Doppler polluée par le fouillis.

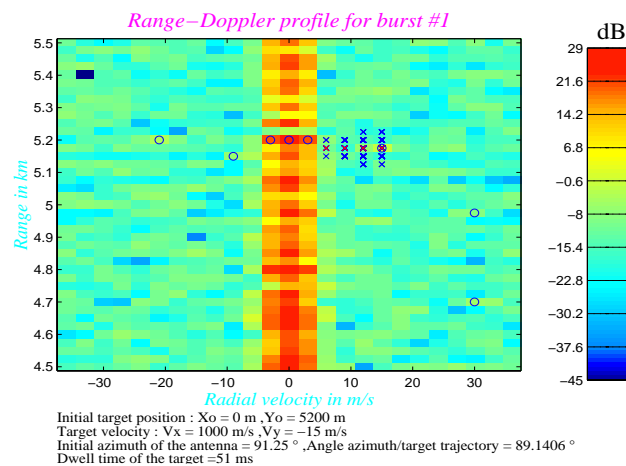


FIG 1 – Carte distance/Doppler

Sur cette figure, nous faisons apparaître en abscisse les bins Doppler et en ordonnée les cases distance. Les cercles bleus correspondent aux cellules distance/Doppler pour lesquelles une pré-détection a eu lieu. C'est uniquement à partir de ces cellules distance/Doppler que sont créées des hypothèses de trajectoires.

Sur la figure, nous avons représenté par des croix bleues l'ensemble des cellules distance/Doppler utilisées dans la

phase de création des hypothèses de trajectoire, uniquement pour la cellule pré-détectée associée à la cible. Ce processus de création des hypothèses est identique pour les autres cellules pré-détectées. Le nombre d'hypothèses de trajectoire associées à la cellule pré-détectée est de 133, ce qui conduit à une réduction en terme de nombre d'hypothèses à tester de l'ordre de  $10^{10}$ . Ce dernier chiffre correspond au nombre de tests qu'il aurait fallu faire si aucun modèle de trajectoire n'avait a priori été fixé. On voit bien que c'est l'introduction de la cinématique de la cible qui permet de réduire fortement la combinatoire du problème.

Finalement, nous avons représenté par des croix rouges les cellules correspondant à l'hypothèse de trajectoire détectée. Nous avons vérifié que les deux trajectoires ne diffèrent que par un écart d'une cellule de résolution distance et ce pour une seule rafale post-intégrée (parmi 10). Ceci signifie que la trajectoire détectée correspond à la trajectoire réelle de la cible sur 90% de la durée d'observation, si l'on raisonne dans le plan distance/Doppler.

Concernant l'étape de détection, il faut noter que certaines hypothèses de trajectoires sont fortement corrélées puisqu'elles partagent des données communes. Ceci signifie que si une hypothèse de trajectoire dépasse le seuil de détection, les hypothèses de trajectoire qui sont corrélées avec la première vont elles-mêmes dépasser le seuil de détection, avec une forte probabilité. Pour cette raison, le détecteur utilisé consiste à prendre le maximum des signaux post-intégrés le long des hypothèses de trajectoire, ce qui garanti qu'une seule hypothèse de trajectoire sera détectée, comme on l'a montré sur la figure précédente.

Les résultats de simulation montrent que la technique d'intégration longue permet de détecter la cible, alors qu'une technique classique aurait été mise en défaut. Toutefois, l'obtention des courbes COR correspondant à cette technique d'intégration longue est encore un problème ouvert, qui ne pourra vraisemblablement être résolu que par simulation de Monte Carlo.

#### 4. Application à un radar à formation de faisceaux par le calcul

Ce chapitre a pour objet de définir de nouveaux traitements adaptés aux longues durées d'observation en utilisant un modèle explicite de cible en mouvement. L'intérêt de ces traitements est d'améliorer la sensibilité des radars à FFC en intégrant le signal rétrodiffusé par la cible le long de sa trajectoire, tout en préservant ses capacités d'antibrouillage.

Dans la mesure où le traitement est basé sur l'intégration du signal le long de la trajectoire de la cible dans un environnement en deux dimensions (l'extension à une situation en trois dimensions se déduit de manière évidente), les paramètres à estimer - regroupés dans un vecteur  $X$  - sont la position initiale de la cible à savoir distance initiale  $d_0$  et direction d'arrivée au départ  $\theta_0$ , et l'évolution de la cible c'est-à-dire son vecteur vitesse (module  $V_0$  et  $\beta_0$  direction par rapport à  $\theta_0$ ).

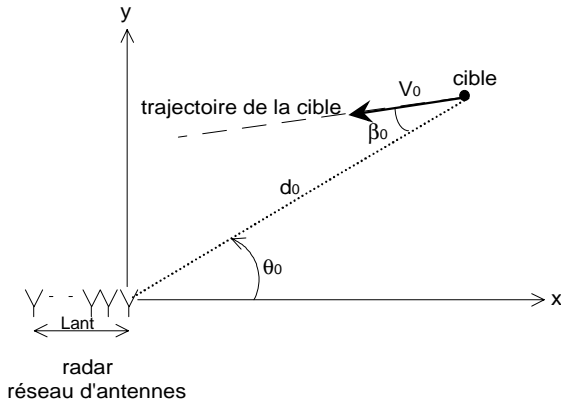


FIG. 2 : Position géométrique

La méthode présentée ici utilise directement les données en sortie de démodulateur amplitude - phase de la chaîne de réception radar. Pour chaque hypothèse cinématique pour laquelle on cherche à détecter une cible, on construit directement pour chaque rafale les filtres adaptés associés. L'avantage est de ne pas avoir de pertes d'échantillonnage associées à l'hypothèse testée et donc d'assurer une probabilité de détection optimale. Une seconde méthode consisterait à convertir les coordonnées cartésiennes de l'hypothèse cinématique en "cases radar" à chaque rafale, puis intégrer les résultats des traitements cohérents correspondants. L'échantillonnage étant prédéfini, les performances dépendent donc de la qualité du maillage des traitements cohérents. Cela va se traduire par des pertes en détection (de 0 à 9 dB pour un maillage gisement - distance - vitesse radiale). Toutefois, l'avantage est d'assurer une compatibilité ascendante vers les architectures radars classiques.

#### Traitement adapté à une cible non fluctuante

La forme du signal reçu permet d'élaborer un traitement adapté (de type filtrage adapté). L'intercorrélation entre le signal intercepté et le modèle est alors réalisée, le vecteur estimé correspond au maximum de corrélation :

$$\hat{X} = \max_X \left\{ \left| \sum_{k=0}^{N-1} F^+(k, X) S(k) \right|^2 \right\}$$

où  $F(k, X)$  est le vecteur de pondérations complexes qui prend en compte la formation de faisceau dans la direction donnée dans le vecteur  $X$ , ainsi que l'évolution de ce même vecteur au cours du temps sur toute la durée de l'observation, et  $S(k)$  est le signal intercepté pour l'impulsion  $k$  (avec  $N$  impulsions dans la rafale).  $F(k, X)$  intègre la fonction d'antibrouillage dans une ou plusieurs directions.

#### Traitement adapté à une cible fluctuante

Le traitement consiste à sommer les modules carrés des résultats issus des traitements cohérents sur chaque rafale pour laquelle on assure la cohérence temporelle de la cible, et cela pour toutes les hypothèses de trajectoire de cible. Le filtrage s'écrit :

$$\hat{X} = \max_X \left\{ \sum_{i=0}^{N_{\text{incoh}}-1} \left| \sum_{m=\text{Num}(i)}^{N_{\text{coh}}(i)-1} F^+(m, i, X) S(m, i) \right|^2 \right\}$$

où  $N_{\text{incoh}}$  est le nombre de rafales intégrées de manière incohérentes,  $N_{\text{coh}}(i)$  est le nombre d'échantillons traités de manière cohérente au cours de la rafale  $i$ , et  $\text{Num}(i)$  est

l'indice sur les numéros des impulsions correspondant à la première impulsion de la rafale  $i$ .

Pour obtenir une probabilité de détection de 0.9 pour  $P_{\text{fa}}=10^{-6}$  - sachant que l'on dispose de 16 capteurs et que la durée d'intégration cohérente est de 3 ms - on vérifie les correspondances durée d'observation - rapport signal-à-bruit suivantes :

TAB. 1 : Performances en détection

$T_{\text{obs}}$	$\text{RSB}_i$	SER à 10 km
30 ms	-18.6 dB	0.05 m <sup>2</sup>
300 ms	-26.1 dB	0.02 m <sup>2</sup>
540 ms	-27.7 dB	0.015 m <sup>2</sup>

#### Traitement adapté au cas multicible

Les migrations des cases vitesse et distance des cibles interceptées par un radar en bande basse sur une longue durée d'observation permettent de discriminer plusieurs cibles ayant des trajectoires différentes, pouvant éventuellement se croiser.

Une méthode par délétion qui réalise un filtre adapté sur une longue durée d'observation et un procédé soustractif itératif qui consiste en la détection et l'estimation des paramètres de la cible la plus "forte" avant de soustraire au signal initial le signal de la cible estimée (traitement récursif) peut résoudre une telle situation.

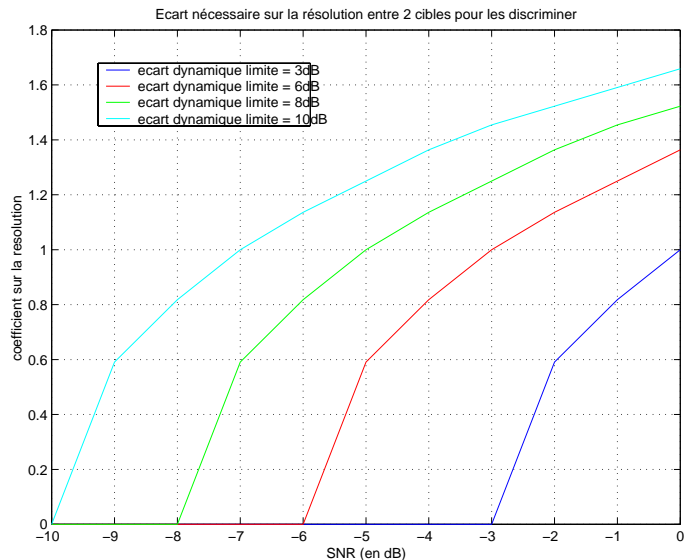


FIG. 3 : Ecart théorique sur la résolution des paramètres estimés en fonction de la différence de rapport signal-à-bruit entre les 2 cibles pour les discriminer

Les méthodes que l'on qualifie de techniques de détection par cellules de résolution défilantes bénéficient des avantages suivants :

- meilleure sensibilité de détection grâce à l'augmentation de la durée d'observation,
- plus grande résistance au brouillage pour les radars à FFC,
- apport d'informations au pistage (position et vitesse des cibles),
- bonne discrimination dans un contexte multicible pour les radars en bande basse.

## 5. Approche par la transformée de Radon & Hough Doppler

Une dernière méthode d'intégration longue, bien connue en traitement d'image depuis 1950 sous le nom de transformée de Hough et utilisant les résultats du mathématicien allemand Radon, nous est donnée par la transformée de Radon généralisée  $R(\eta)$ , définie comme suit :

$$R(\eta) = \int f(x, \phi(x, \eta)) dx \quad \text{où } y = \phi(x, \eta)$$

représente la courbe paramétrée, représentant ici la trajectoire d'une cible. Le filtre adapté consiste à intégrer les données le long des différentes trajectoires potentielles :

$$R(\eta) = \iint f(x, y) \cdot \delta(y - \phi(x, \eta)) \cdot dx \cdot dy \cdot$$

Cette technique a été appliquée récemment dans le domaine radar en ne considérant que les amplitudes des détections radar [4][5]. Nous avons étendu ce procédé au domaine radar en définissant une transformée de Radon Doppler qui tient compte des sorties des bancs de filtres Doppler. Pour ce faire, dans un secteur azimut donné, nous considérons les détections radar dans l'espace distance/temps (numéro de rafale ou tour d'antenne). Il existe alors un lien entre la pente de la trajectoire et la sortie du banc de filtre Doppler supposée répondre modulo l'ambiguïté Doppler. L'idée consiste à accumuler dans l'espace de Radon des paramètres  $(\rho, \theta)$ , paramétrant les droites de l'espace distance/temps, et pour lequel à chaque position en distance /temps correspond une sinusoïde dans l'espace  $(\rho, \theta)$ , les sorties des bancs de filtres Doppler correspondant à la valeur du paramètre  $\theta$  considéré. Ainsi, à l'équation classique, de la transformation de Radon, nous ajoutons l'équation liant la vitesse radiale  $V_r$  (pente de la droite en distance/temps) avec le paramètre  $\theta$  dans l'espace des paramètres. Nous tenons compte de l'ambiguïté vitesse radar  $V_b$ , pour relier le paramètre  $\theta$  avec une fréquence Doppler  $f_n$  et donc une sortie de banc de filtre  $P_n^k$ . Pour une détection  $(r_k, t_k)$ , on accumulera dans les cellules de l'accumulateur  $C(\rho, \theta)$  dans l'espace des paramètres le long de la cellules, les sorties des bancs de filtres pour les variations de  $\theta$  considérées, suivant les équations suivantes :

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{t_k^2 + r_k^2} \cdot \sin\left(\theta + \arctan \frac{t_k}{r_k}\right) \\ \theta = \frac{\pi}{2} - \arctan V_r \end{cases} \text{ discrétisé par}$$

$$\begin{cases} V_{r,i} = \tan\left(\frac{\pi}{2} - \theta_i\right) \\ V_{r,i}^u = V_{r,i} - \left\lfloor \frac{V_{r,i}}{V_b} \right\rfloor V_b \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \text{Si } f_n < \frac{2V_{r,i}^u}{\lambda} \leq f_{n+1} \text{ alors} \\ C(\rho_i, \theta_i) = C(\rho_i, \theta_i) + P_{n+1}^k \end{cases}$$

L'expression de la transformée de Radon Doppler est alors donnée par l'expression générale suivante :

$$R(\rho, \theta) = \iiint_{(r,t,f_d) \in D_r, xD, xD_{f_d}} f(r, t, f_d) \cdot \delta(\rho - t \cos \theta - r \sin \theta) \cdot \delta(f_d, \theta, V_b) \cdot dr \cdot dt \cdot df_d$$

avec  $\delta(f_d, \theta, V_b) = \delta\left(f_d - \frac{2 \cdot \left[ \tan\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) \bmod V_b \right]}{\lambda}\right)$

Cette approche possède un coût de calcul très faible, car l'ensemble des sorties des filtres Doppler peuvent être gérées en temps réel en accumulant les données à l'aide d'un adressage fixe pré-tabulé. L'approche permet également de lever l'ambiguïté Doppler pour la cible détectée. Cette approche permet également de robustifier l'initialisation de pistes dans des zones denses en fausses alarmes.

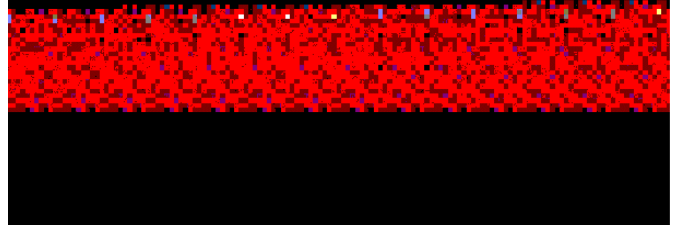


FIG.4 : Transformée de Radon Doppler (abscisse :  $\theta$ , ordonnée  $\rho$ ) à partir des sorties de bancs de filtres Doppler

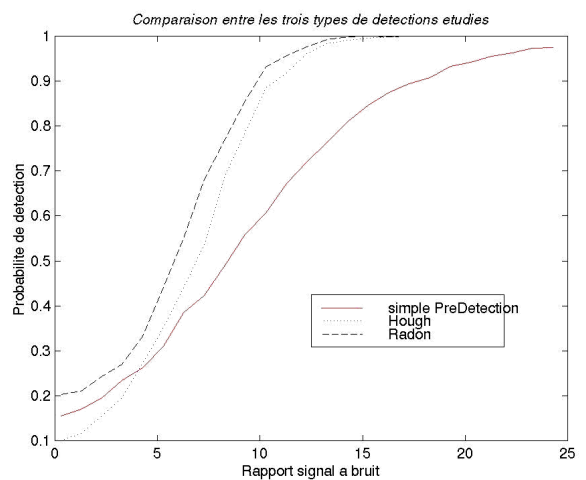


FIG 5. Comparaison des Courbes de Performances entre le seuillage simple des filtres Doppler, les transformées de Hough & Radon Doppler

## 6. Remerciements

Différents travaux ont été confiés par la DGA à Thomson-csf Airsys, nouvellement Thales Air Defence, sur le sujet de l'intégration longue. Les travaux présentés dans cet article ont été partiellement financés par la DGA (STTC & SPAé).

## Références

- [1] F. Le Chevalier, L. Savy, "Wideband coherent radar for moving target detection", IRS 98, 15-18 September 1998.
- [2] "Direct evaluation of radar detection probabilities", IEEE AES Vol.23 N°4, 07/1987.
- [3] G.T. David, "Noncoherent gain enhancement technique for improved detection estimation performance", US Patent 6018311, January 25 2000.
- [4] B.D. Carlson, E.D. Evans & S.L. Wilson, "Search Radar Detection and Track with the Hough Transform", IEEE Trans. on AES, vol. 30, n°1, pp.102-125, January 1994
- [5] C. Piva, "Evaluation of Methods for Non-Coherent Integration of SNR in Radar Signal Processing", Thèse, UPTec 951405, Uppsala Univ., Sweden, Dec. 1995
- [6] D.L. Donoho, « Fast Slant Stack : A Notion of Radon Transform for Data on a Cartesian Grid », Berkeley Technical Report, 2001