

1. Contexte radar et enjeu du filtrage

Marc Montécot¹, François Le Chevalier², Laurent Savy³

1. Thales Systèmes Aéroportés
2 Avenue Gay Lussac
F-78851 Elancourt Cedex
marc.montecot@fr.thalesgroup.com

2. THALES Air Operations
3 Avenue Charles Lindbergh
F-94628 Rungis
francois.lechevalier@thalesgroup.com

3. ONERA, the French Aerospace Lab
BP 80100
F-91123 Palaiseau Cedex
laurent.savy@onera.fr

RÉSUMÉ. Les traitements adaptatifs spatio-temporels, en anglais Space Time Adaptive Processing (STAP), sont des traitements qui exploitent conjointement les deux dimensions spatiale et temporelle des signaux reçus sur un réseau d'antennes, contrairement au traitement d'antenne classique qui n'exploite que la dimension spatiale, pour leur filtrage/séparation. L'arrivée des antennes actives à réception multivoies ainsi que l'accroissement des capacités de calcul des machines de traitements embarquées ont permis l'implémentation de ces techniques. L'objectif de cet article est de montrer dans un contexte radar aéroporté, l'apport de ces traitements en fonctions des différentes missions (ou fonctions radar) que ce soit en mission Air / Sol (détection des cibles terrestres mobiles) ou en mission Air / Air (détections des cibles aériennes). Deux configurations canoniques mettant en évidence l'intérêt des traitements STAP seront étudiées : la configuration radar à antenne à implantation latérale (application Air/Sol pour la détection des cibles lentes sur avion de surveillance) et la configuration radar à antenne à implantation frontale (application Air/Air et détection des cibles aériennes sur avion de combat). Des exemples concrets pour ces deux types de missions seront présentés. Cependant, en introduction, nous rappellerons quelques applications autres que celles du radar aéroporté où ces traitements spatio-temporel peuvent être appliqués.

ABSTRACT. Space-Time Adaptive Processing (STAP) is a technique useful when the distribution of disturbances exhibits a strong coupling between space (or angular) and time (or range, or Doppler) dimensions. A typical example of such situations is observed with airborne radars where clutter echoes from a specific direction come with a specific Doppler shift. The filtering of these clutter echoes will be more efficient if this relation is taken into account.

The main examples of such situations for airborne radars are the detection of ground targets – where the targets are partly masked by clutter echoes coming through the main lobe of the

antenna – , and the detection of air targets, where the target returns are competing with clutter echoes coming from other directions, through the sidelobes of the antenna.

Space-time adaptive processing is also helpful in many other situations, e.g. communication systems, satellite navigations systems, or active sonar detection systems, where similar couplings exist between the space and time dimensions for disturbances (jamming, or reverberation in sonar).

MOTS-CLÉS : radar, STAP, GMTI, air/ air missions, post ou pré doppler.

KEYWORDS: radar, STAP, GMTI, air to air, post or pre doppler.

DOI:10.3166/TS.28.15-34 © 2011 Lavoisier, Paris

Extended abstract

In this paper, the airborne radar situation is described in detail, with examples of clutter localisation in space-time domain, and some results obtained with a real radar.

Airborne pulse-Doppler radars transmit bursts of periodic pulses, which provide a correct detection capability, but remain ambiguous in range and Doppler. The typical output of such a radar is a range Doppler map, as shown in Figure 1 for a medium repetition frequency mode (forward-looking radar), where clutter is distributed according to the geometrical configuration (platform movement, beam pointing, etc.). The detection performance is severely reduced for some Doppler areas, and STAP is a way to mitigate these limitations.

The other typical situation where STAP brings valuable benefits is the side-looking configuration, where there is a direct relation between the azimuth and the Doppler effect of clutter echoes. In such situations, the minimum detectable velocity is largely improved with STAP due to the high resolution and adaptivity properties of such filtering (Figure 8).

In this example, STAP can simply be analysed either as an angular processing after Doppler analysis (post-Doppler architecture), or as a movement compensation implemented on time signals (pre-Doppler architecture).

For forward-looking radars, the situation, though more complex to visualize, is similar, but the clutter echoes are distributed along an ellipse in the angle-Doppler plane. In this situation, STAP again brings substantial benefits, by drastically reducing the range-Doppler areas where detection is limited by clutter. This has been demonstrated in realistic simulations (Figure 16) and validated through real measurements (Figure 17).

This brief overview of STAP application for airborne radars illustrates how non-isotropic distribution of disturbances can be taken into account, and the expected benefits for typical situations, through high resolution in angle and velocity and adaptivity to real situations.

1. Introduction

Les traitements adaptatifs spatio-temporels, en anglais *Space Time Adaptive Processing* (STAP), sont des traitements qui exploitent conjointement les deux dimensions spatiale et temporelle des signaux reçus sur un réseau d'antennes, contrairement au traitement d'antenne classique qui n'exploite que la dimension spatiale, pour leur filtrage/séparation. Cette structure de traitement permet de tirer parti des propriétés spécifiques bidimensionnelles spatio-temporelles (ou dans le domaine dual, angle-fréquence), des signaux reçus. Cela s'avère particulièrement intéressant notamment dans le cas d'une propriété de couplage angle-fréquence des signaux reçus, où, si les signaux sont étendus dans les deux espaces pris séparément, ils n'occupent cependant qu'une dimension 1D dans l'espace 2D. Leur filtrage/séparation devient alors possible par traitements adaptatifs bidimensionnels, alors qu'elle ne l'était pas par traitement mono-dimensionnel spatial ou temporel.

Cette problématique se rencontre en particulier dans le cadre du filtrage des signaux d'échos de sol reçus par un radar aéroporté, pour lesquels il existe un lien direct entre direction d'arrivée et fréquence Doppler¹. Ces échos de sol, ou fouillis, sont classiquement filtrés en radar par un traitement spatial (filtrage spatial par le lobe d'antenne) suivi d'un traitement Doppler (filtrage fréquentiel). Ces échos, étendus dans les deux domaines spatial et fréquentiel, ne sont ainsi qu'imparfaitement filtrés, et leurs résidus limitent encore fortement les performances en détection.

Dans ce contexte, l'apport des traitements STAP est essentiel, et leur implantation dans des produits opérationnels est maintenant rendue possible par l'arrivée d'antennes actives à réception multivoies, associée à l'accroissement des capacités de calcul des machines embarquées. Les deux applications principales à court et moyen termes en radar aéroporté sont :

- la détection des cibles terrestres mobiles lentes en mode Air-Sol (cible en compétition avec les échos de fouillis entrant par le lobe principal de l'antenne) ; l'objectif principal est alors d'améliorer la vitesse minimum détectable, et de localiser les cibles ainsi détectées ;
- l'amélioration de la détection des cibles aériennes sur les zones de la carte radar distance-Doppler polluées par le fouillis en mode Air-Air (cible en compétition avec les échos de fouillis entrant par les lobes secondaires de l'antenne).

Le choix d'une architecture précise de traitement, notamment pré- ou postanalyse Doppler, reste cependant très complexe en raison de la variété à la fois des architectures possibles et des contextes opérationnels, ainsi que des arguments parfois contradictoires qui président à ce choix.

Cette nécessité d'un recours aux traitements spatio-temporels se rencontre aussi dans le domaine des communications (A.J. Paulraj, C. Papadias., 1997 ; F. Pípon *et al.*, 1997). La plupart des systèmes de télécommunications sont limités à la fois par les trajets multiples en propagation et par les interférences. C'est en particulier le cas

1. À côté de ces applications aéroportées, il existe également d'autres applications en radar : autodirecteurs, antibrouillage des radars de surface, etc.

pour les réseaux de communication cellulaires mobiles en milieu urbain, pour lesquels les trajets multiples sont dus principalement aux réflexions sur les bâtiments et à la diffraction au voisinage de l'antenne de réception. Les interférences sont par ailleurs liées au concept de réutilisation des fréquences dans les réseaux cellulaires.

Dans ces conditions, la combinaison des filtrages spatial et fréquentiel permet d'améliorer significativement les performances. Il est même possible de bénéficier ainsi d'un effet de diversité additionnel (combinaison de la diversité fréquentielle et de la diversité angulaire).

Un autre domaine où les traitements spatio-temporels apportent une efficacité supplémentaire est celui de la navigation satellitaire (G. Carrie *et al.*, 2006), pour laquelle le très faible niveau des signaux reçus des satellites entraîne une vulnérabilité intrinsèque aux interférences, volontaires ou non. Pour y remédier, des techniques d'antennes adaptatives ont été examinées et évaluées, mais les contraintes de volume et de poids conduisent généralement à des réseaux comportant un petit nombre d'antennes (typiquement 3 à 7). Dans ces conditions, un traitement uniquement spatial conduit à un nombre de degrés de liberté insuffisant dans les environnements les plus difficiles. Les traitements spatio-temporels offrent la possibilité d'augmenter ce nombre de degrés de liberté, en ajustant les diagrammes d'antennes différemment aux différentes fréquences (filtrage angle-fréquence).

Un dernier exemple caractéristique d'emploi des traitements STAP est le cas des sonars actifs, pour lesquels la détection des cibles lentes en présence de forts échos d'environnement (« réverbération ») est une problématique importante (Y. Doisy *et al.*, 2008), pour les navires de surface comme pour les sous-marins. Pour ces applications, le grand nombre de capteurs élémentaires (plusieurs centaines) conduit à préférer des architectures de traitement après formation de faisceaux classique, de façon à simplifier le traitement et surtout à rendre possible l'estimation des coefficients de filtrage sur des échantillons de bruit dont le nombre est limité par les non-stationnarités des phénomènes.

Dans la section suivante, l'article présentera plus en détail l'intérêt et la problématique du traitement STAP dans le contexte radar aéroporté. Deux configurations canoniques mettant en évidence l'intérêt des traitements STAP seront étudiées : la configuration radar à antenne à implantation latérale (application Air-Sol pour la détection des cibles lentes sur avion d'affaires) et la configuration radar à antenne à implantation frontale (application Air-Air et détection des cibles aériennes sur avion d'armes). L'accent sera mis sur la localisation du fouillis dans le domaine distance-Doppler-angle, à l'origine de l'intérêt des traitements STAP et de leurs spécificités en fonction de l'application.

Les notations utilisées sont définies dans (S. Bidon, 2011).

2. STAP et traitement des signaux radar

2.1. Généralités

Le traitement du signal radar comprend les tâches de détection et d'estimation de la position (distance, Doppler, angle) des cibles. La tâche de détection est celle qui requiert le plus gros effort, l'estimation de la position n'étant réalisée que pour les

cibles détectées, peu nombreuses en regard du nombre de cases (ou positions) distance-Doppler-angle à tester.

Le but final du traitement radar est d'assurer une bonne probabilité de détection [PD] tout en maintenant une très faible probabilité de fausse alarme (PFA) Ce dernier point est à la fois le plus important et le plus critique à assurer.

Dans la plupart des détecteurs à taux de fausse alarme constant (CFAR, *Constant False Alarm Rate*) la statistique de la case distance-Doppler-angle sous test est comparée à celle de « données secondaires » collectées dans les cases voisines. Par exemple le classique *cell averaging* CFAR (CA-CFAR) compare le niveau de puissance dans la case sous test (CST) au niveau moyen reçu sur un ensemble de cases secondaires voisines. Si le niveau dans la case sous test excède le niveau dans les cases secondaires de plus d'un certain seuil, une détection est alors déclarée. Ce seuil est choisi pour assurer une probabilité de détection suffisante, tout en maintenant basse la probabilité de fausse alarme. De manière évidente, PD et PFA sont affectées de manière contraire par la présence de fouillis (échos de sol) ou de brouillage. Tout l'enjeu du traitement radar est de présenter une grande robustesse vis-à-vis de ces signaux parasites, et cela de manière primordiale vis-à-vis de la PFA.

Les radars aéroportés « pulse-Doppler » émettent classiquement des rafales d'impulsions périodiques, présentant l'avantage de posséder une fonction d'ambiguïté de bonne qualité en dehors des ambiguïtés régulières distance-Doppler (fonction d'ambiguïté de type « planche à clous »). Les ambiguïtés en distance D_a et en vitesse (Doppler) V_a sont liées par la relation :

$$D_a V_a = \frac{c}{2} T_r \frac{\lambda}{2T_r} = \frac{\lambda c}{4}.$$

Le radar est donc utilisé soit dans un mode à basse fréquence de récurrence (BFR), non ambigu en distance mais très ambigu en vitesse, soit dans un mode à haute fréquence de récurrence (HFR), non ambigu en vitesse mais très ambigu en distance, soit enfin dans un mode à moyenne fréquence de récurrence (MFR), ambigu en distance et vitesse.

Ce dernier mode, MFR, est très critique pour les radars aéroportés, car il permet d'assurer la détection et la poursuite de cibles dans à peu près toutes les présentations (rapprochement ou éloignement), avec une qualité qui est fixée pour l'essentiel par les niveaux de fouillis reçus par les lobes secondaires d'antenne. C'est ce qui apparaît sur la Figure 1, qui rappelle la localisation du fouillis de sol en fonction de la distance, de la vitesse et du diagramme de rayonnement. L'exemple dans le domaine ambigu $D_a V_a$ représente le fouillis après repliement distance et fréquence Doppler pour une forme d'onde MFR (moyenne fréquence de récurrence).

En fonction de la forme d'onde radar émise, ce fouillis va être ambigu en distance et/ou vitesse. La Figure 2 montre l'influence de ce fouillis dans une carte de détection $D_a V_a$ (Distance Ambiguë-Vitesse Ambiguë) ainsi que son influence sur une carte de probabilité de détection en fonction de la distance et de la vitesse pour une configuration radar de pointe avant et un mode MFR. Pour ce mode MFR, un jeu de plusieurs rafales avec des valeurs de FR différentes sont émises afin de lever les ambiguïtés à la fois en distance et en fréquence (Lacomme *et al.*, 2001).

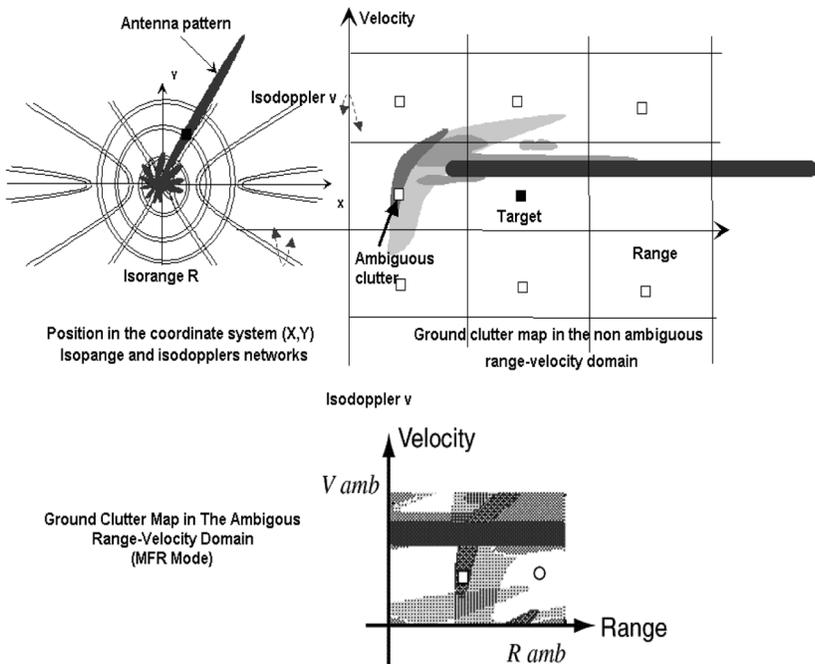


Figure 1. Localisation du fouillis dans le plan distance/fréquence

Sur cette carte de probabilité de détection, on remarque différentes zones en distance et en vitesse où le fouillis dégrade la probabilité de détection : la zone A (passe arrière) où la dégradation est principalement due aux fouillis des lobes secondaires et le retour d'altitude (retour de sol à la verticale du porteur, pour un vol horizontal), la zone B (secteur travers) où la dégradation est principalement due au lobe principal et la zone D qui correspond au premier rang d'ambiguïté vitesse des différents blocs émis où l'on retrouve l'influence des lobes secondaires et du lobe principal. La zone C représente la zone de détection sur bruit thermique. Dans le paragraphe 2.4 (Figure 16) l'apport du traitement STAP sur ces différentes régions sera présenté.

Pour les cibles détectées, le traitement radar doit également préserver la possibilité de mesures distance, Doppler, et angle.

Les antennes actives à sous réseaux qui procurent plusieurs voies de réception spatiales offrent la possibilité de mise en œuvre de traitements STAP de suppression de fouillis et du brouillage, exploitant les propriétés spécifiques bidimensionnelles spatio-temporelles (ou dans le domaine dual, angle-fréquence), des signaux reçus, qui améliorent la détection par rapport au cas monopulse (détection sur la voie somme de l'antenne et localisation sur les voies écartométriques), tout en permettant la fonction de localisation. Un exemple d'antenne multivoie est présenté sur la Figure 3 (antenne du démonstrateur européen AMSAR issue de la collaboration France/Grande-Bretagne/Allemagne) ainsi qu'une antenne monopulse classique (source Thales).

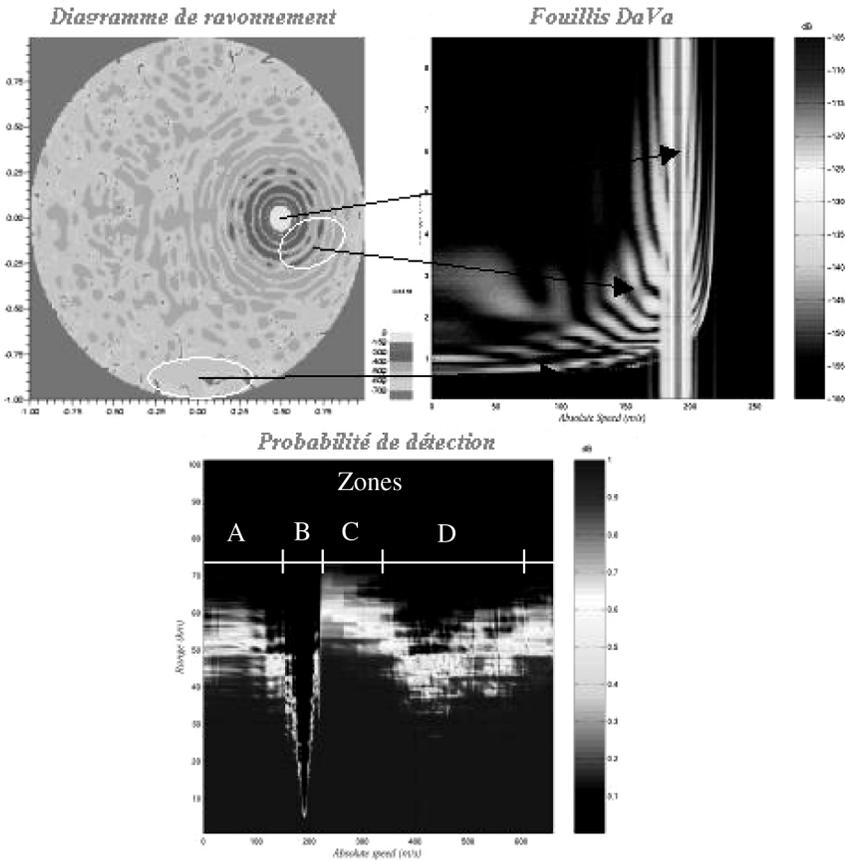


Figure 2. Influence du fouillis sur la probabilité de détection

Deux configurations canoniques vont être analysées, afin de mettre en évidence l'intérêt des traitements STAP et l'importance de la localisation distance-Doppler-angle du fouillis vis-à-vis du choix d'une architecture de traitement. L'étude de ces deux configurations simples permettra d'accéder à des expressions analytiques du filtrage STAP, c'est-à-dire à des versions déterministes du filtrage spatio-temporel, que l'on continuera abusivement à appeler filtrage STAP. Le principe des deux macro-architectures, STAP Pré-Doppler ou STAP Post-Doppler sera déduit, mettant en parallèle ces deux visions duales de la problématique STAP.

Dans la pratique, bien sûr, le filtrage STAP ne peut s'envisager que de manière adaptative, et non pas déterministe, notamment pour les raisons suivantes :

- Sous réseaux non identiques et méconnaissance de leur diagramme de rayonnement,
- Configuration non parfaitement maîtrisée (mouvement du porteur, trajectoire...),

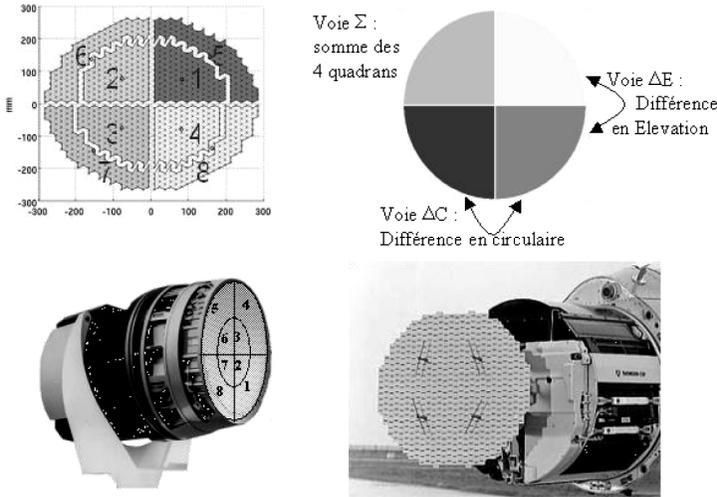


Figure 3. Antennes multivoies et monopulse

- Défauts de calibrations entre voies de réception,
- Niveau du signal parasite à supprimer supérieur typiquement de 2 à 4 ordres de grandeur à celui du signal d'intérêt.

2.2. Configuration radar à Antenne à implantation latérale

2.2.1. Nécessité des traitements STAP

La configuration à implantation latérale, décrite schématiquement en Figure 4, est typiquement celle d'un système de surveillance air-sol sur avion d'affaires rapide. L'antenne est à implantation latérale, et la forme d'onde radar est typiquement BFR (Basse fréquence de récurrence), évitant ainsi des ambiguïtés distance. La problématique est la détection des cibles terrestres à vitesse radiale faible (mode GMTI, pour *Ground Moving Target Indicator*) en compétition avec les échos de fouillis en provenance du lobe principal de l'antenne et vus à des vitesses comparables à celles des cibles recherchées.

L'apport du STAP pour les modes GMTI permet de diminuer la vitesse minimale détectable (MDV). Cela permet d'améliorer la détection des cibles lentes, mais également la détection des cibles rapides ayant une vitesse radiale faible due à une trajectoire différente de l'axe de visée, permettant ainsi d'améliorer l'acquisition de la situation tactique (SITAC) sur l'ensemble du domaine angulaire.

Dans cette configuration latérale, la fréquence Doppler, f_d , d'un écho de fouillis est cependant directement reliée à son angle d'arrivée ϕ dans le repère antenne par la relation fondamentale pour une antenne latérale (Figure 4) :

$$f_d = \frac{2v_a}{\lambda} \cos \phi \quad [1]$$

ce qui conduit à un étalement Doppler des échos de sol vu par le lobe principal de :

$$\Delta f_d = \pm \frac{2v_a}{\lambda} \sin \phi \cdot \theta_{3 \text{ dB}} = \pm \frac{2v_a}{\lambda} \cdot \theta_{3 \text{ dB}}$$

où $\theta_{3 \text{ dB}}$ est l'ouverture à 3 dB du lobe d'antenne et $\phi = 90^\circ$ en configuration latérale.

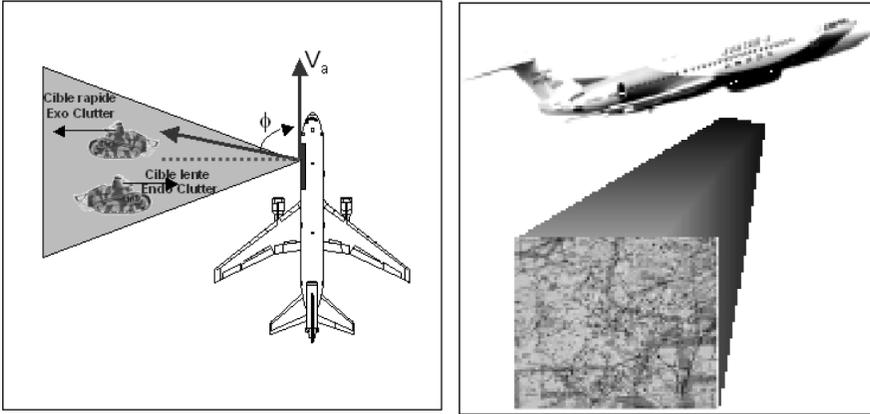


Figure 4. Configuration Radar à antenne latérale et mode GMTI

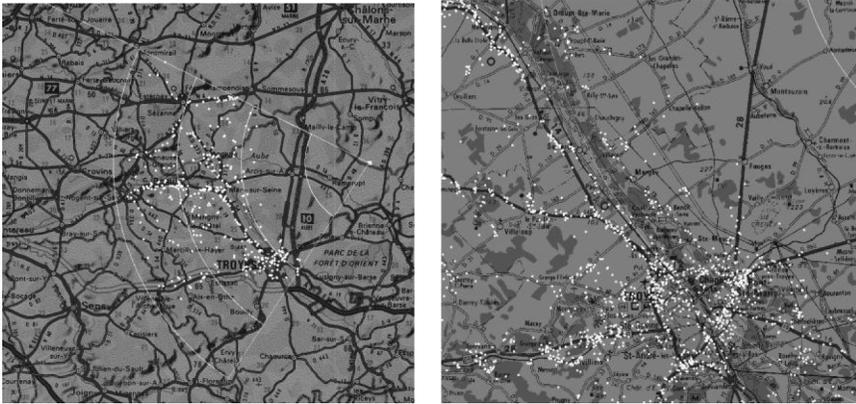


Figure 5. Amélioration de la SITAC grâce au STAP

Un traitement spatio-temporel bidimensionnel peut alors tirer parti de la relation [1], qui montre que dans le plan angle-Doppler le fouillis se focalise le long d'une droite, et n'occupe donc qu'un espace 1D dans le plan 2D (Figure 7).

La mise en œuvre d'un filtre bidimensionnel spatio-temporel opérant le long de la droite de fouillis permet alors la réjection du fouillis tout en conservant les cibles endo-fouillis, alors qu'aucun des deux traitements monodimensionnels d'élimination du fouillis, filtrage spatial ou filtrage temporel (appelé aussi classiquement filtrage Doppler) ne permet de conserver la cible endo-fouillis.

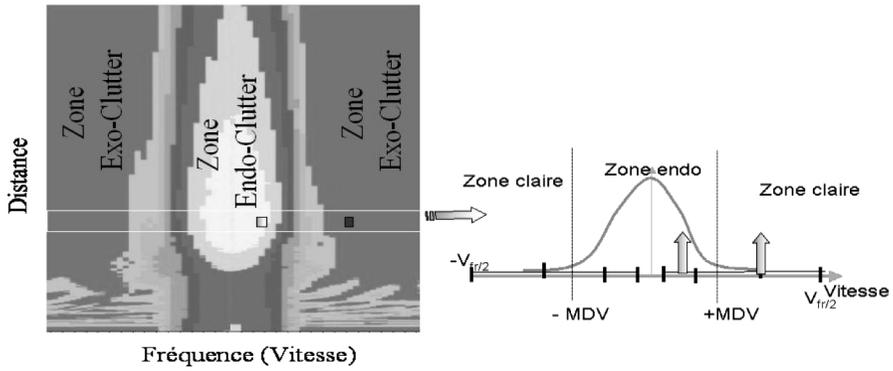


Figure 6. Carte DaVa BFR (zone endo et exo)

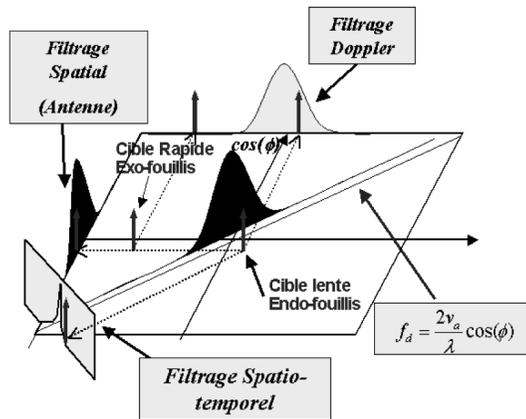


Figure 7. Filtrage STAP dans le plan angle-Doppler

Pour le cas d'un mode GMTI (mode BFR), un exemple de détection d'une cible endo-fouillis avec le traitement STAP est présenté sur la Figure 7 représentant une carte distance / fréquence, avec comme référence le traitement Doppler classique (voie Somme).

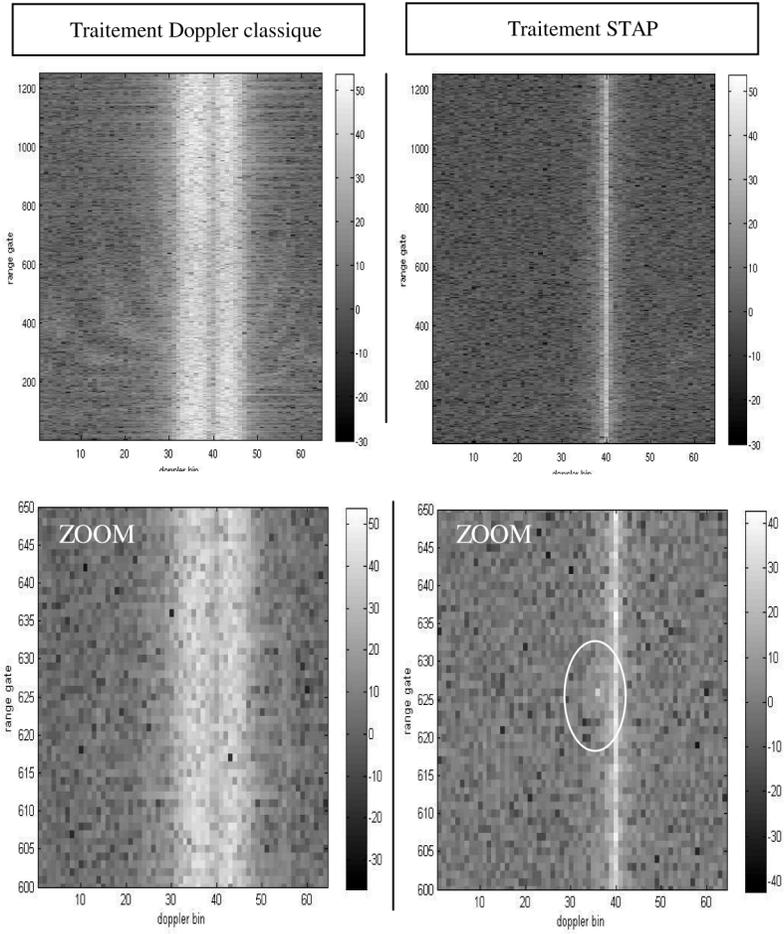


Figure 8. Traitement Doppler classique et STAP

Du point de vue angle Doppler, Doppler et angle d'arrivée sont couplés pour les échos de fouillis. De façon duale, du point de vue spatio-temporel cela revient à utiliser le fait que chaque capteur voit le même fouillis mais à des instants différents (Figure 9) :

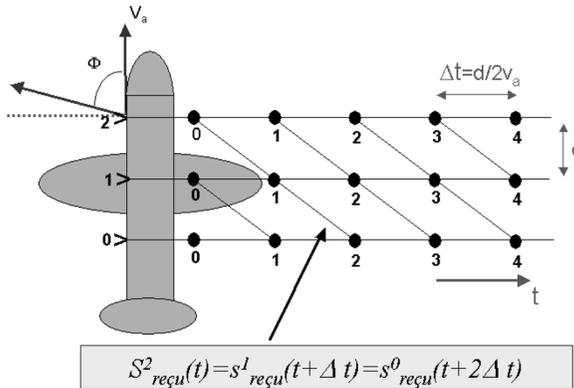


Figure 9. Point de vue Spatio-temporel

2.2.2. Traitement STAP – Le point de vue Post-Doppler

L'analyse précédente dans le plan angle Doppler conduit naturellement au principe des traitements STAP post-doppler. En effet, il est évident d'après la Figure 7 que l'élimination du fouillis peut être réalisée par un filtre spatial réalisant un zéro sur la droite de fouillis, et donc un zéro angulaire dont la position dépend de la fréquence Doppler. Cette approche est référencée dans la littérature sous le nom de Factored STAP (Klemm R., 2002). On suppose, pour poursuivre l'analyse, une antenne parfaitement alignée sur le vecteur vitesse et constituée de deux sous réseaux identiques espacés d'une distance d (Figure 10), recevant respectivement les signaux $s^0(t)$ et $s^1(t)$:

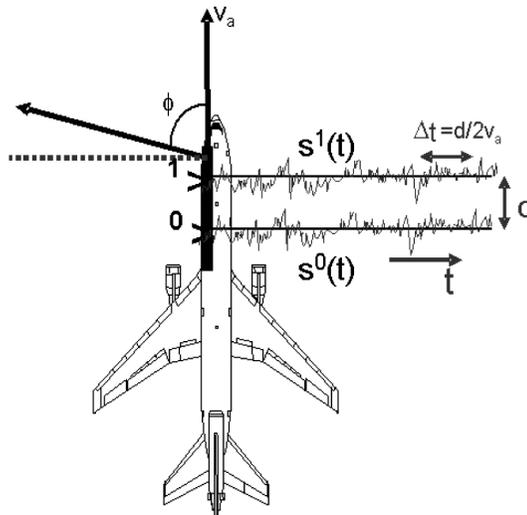


Figure 10. Antenne à deux sous réseaux (Radar à antenne latérale)

Sous ces hypothèses, une expression analytique du filtrage STAP post-Doppler peut être obtenue :

$$X_{\text{post}}(f_d) = \tilde{s}^0(f_d)e^{j2\pi\frac{d}{\lambda}\cos\phi} - \tilde{s}^1(f_d)$$

avec

$\tilde{s}^0(f_d)$ et $\tilde{s}^1(f_d)$: Spectres Doppler sur les sous réseaux 0 et 1,
 ϕ : Angle d'arrivée du fouillis à la fréquence Doppler f_d ,
 d : distance entre les centres de phase des deux sous réseaux,
 λ : longueur d'onde.

Pour les échos de fouillis $\cos\Phi = f_d \cdot \frac{\lambda}{2v_a}$, le filtrage se réécrit donc :

$$X_{\text{post}} = \tilde{s}^0(f_d)e^{j2\pi f_d \frac{d}{2v_a}} - \tilde{s}^1(f_d) \quad [2]$$

Cette dernière écriture met en évidence la réalisation d'un filtre spatial dont le coefficient dépend de la fréquence (aspect spatio-fréquentiel). Elle permet également de déduire l'allure du filtre STAP réalisé en remarquant que :

Pour une cible au centre du lobe d'antenne :

$$\tilde{s}^1(f_d) = \tilde{s}^0(f_d) = A,$$

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda}, \text{ avec } v_r \text{ sa vitesse radiale,}$$

$$\frac{d}{\lambda} = \frac{1}{2\theta_{3\text{dB}}}$$

Alors [2] devient :

$$X_{\text{post}} = A \cdot e^{j\pi\frac{v_r d}{v_a \lambda}} \cdot 2j \sin\left(\pi\frac{v_r}{v_a}\frac{d}{\lambda}\right) = A \cdot e^{j\pi\frac{v_r}{v_a}\frac{d}{\lambda}} \cdot 2j \sin\left(\frac{\pi}{4}\frac{v_r}{v_a\frac{\theta_{3\text{dB}}}{2}}\right)$$

conduisant à la forme suivante du filtre STAP (Figure 11) :

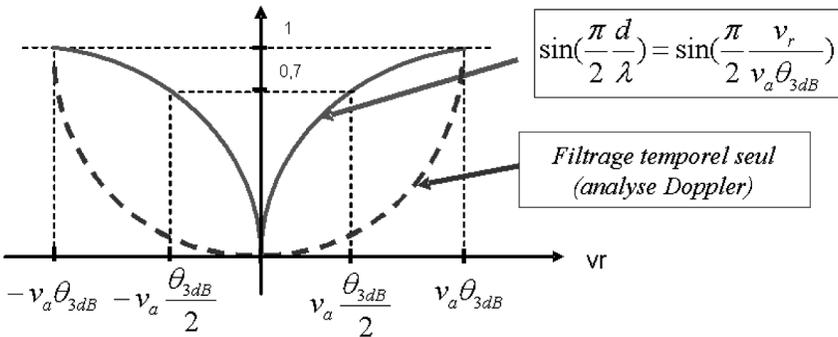


Figure 11. Forme du filtre STAP post-Doppler pour la configuration Radar à antenne latérale, et une cible dans l'axe de visée de l'antenne

Les analyses précédentes permettent d’estimer rapidement l’apport du STAP pour une configuration Air-Sol à visée latérale dans une étape de définition système.

2.2.3. Traitement STAP – Le point de vue Pré-Doppler

Le traitement STAP pré-Doppler dual du traitement post-Doppler précédent se déduit immédiatement par transformée de Fourier inverse de l’expression [2] par rapport à f_d . Il s’écrit :

$$X_{\text{pré}} = s^0 \left(t + \frac{d}{2v_a} \right) - s^1(t) = Ae^{j2\pi f_d t} e^{j\pi \frac{v_r}{v_a} \frac{d}{\lambda}} 2j \sin \left(\pi \frac{v_r}{v_a} \frac{d}{\lambda} \right)$$

Dans la configuration canonique, le traitement STAP pré-Doppler consiste donc à soustraire les signaux issus des deux sous réseaux à des instants décalés de $D/2V$ (Figure 12). Ce traitement, ancêtre des traitements STAP, est référencé dans la littérature (Klemm R., 2002) sous le vocable de traitement DPCA (*Displaced Phase Center Antenna*). Il peut également se déduire directement de manière intuitive en remarquant que le centre de phase de l’ensemble (Emetteur – sous réseau 1) aura pris physiquement la place du centre de phase de l’ensemble (Emetteur – sous réseau 0) après une durée $d/2v_a$, et verra donc exactement le même fouillis $d/2v_a$ plus tard.

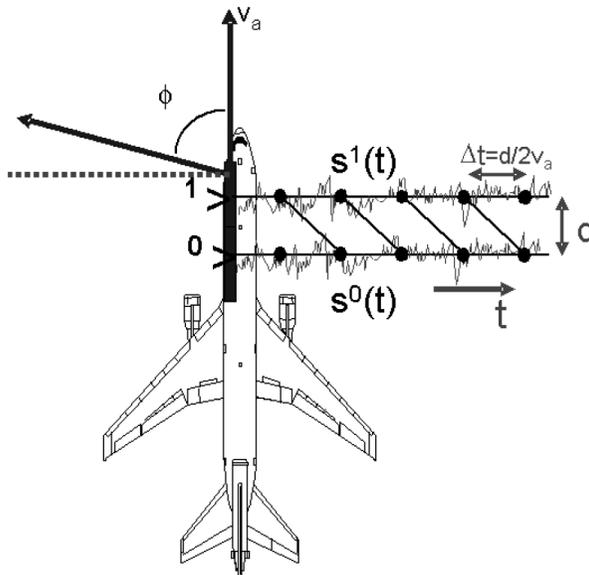


Figure 12. Traitement STAP pré-Doppler pour la configuration Radar à antenne latérale

2.4. Configuration radar à antenne à implantation frontale

Cette configuration est typiquement celle de radars implantés sur avion d'armes. La forme d'onde radar est typiquement MFR (moyenne fréquence de récurrence), avec présence d'ambiguïtés distance et vitesse. La problématique est la détection des cibles aériennes (mode Air-Air) en compétition avec les échos de fouillis en provenance des lobes secondaires de l'antenne (mode veille) voire en provenance du lobe principal (mode poursuite).

L'implantation frontale de l'antenne conduit à une répartition du fouillis plus complexe que précédemment dans le plan angle-Doppler. Pour une case distance non ambiguë, celui-ci se concentre en effet sur une ellipse (Figure 13).

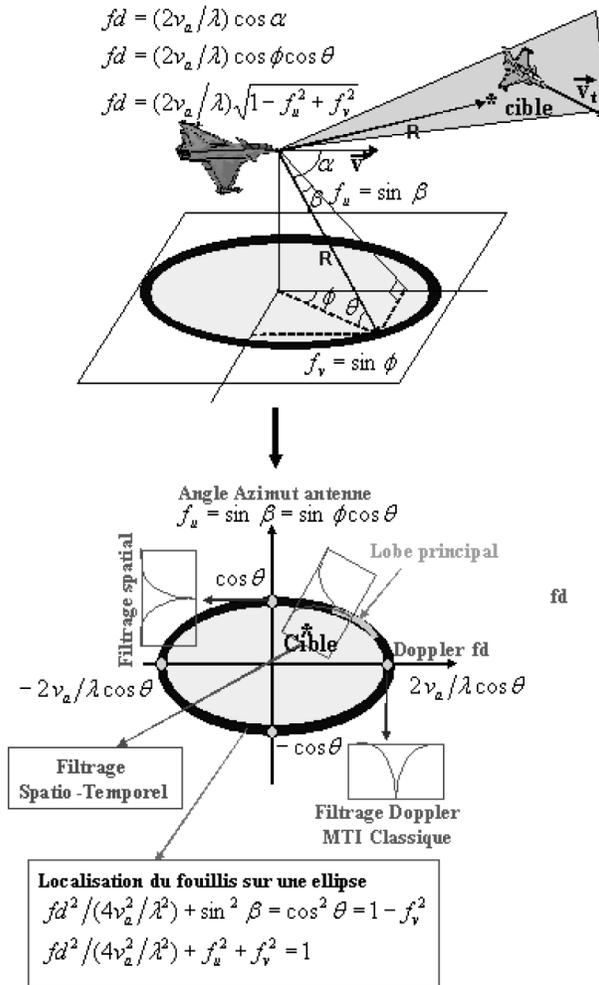


Figure 13. Localisation du fouillis dans le plan Angle azimuth-Doppler (antenne frontale)

La taille de cette ellipse dépend de l'angle d'élévation, θ_e sur la Figure 13, sous lequel est vu le fouillis, et donc de la distance R considérée. Il devient nécessaire, pour appréhender correctement la problématique STAP dans cette configuration (et toute configuration autre que l'antenne latérale), de considérer non plus seulement le plan (angle azimut-Doppler), mais l'espace tridimensionnel (angle azimut-angle élévation-Doppler) et plus exactement l'espace des cosinus directeurs-Doppler, (f_u, f_v, F_d) .

La localisation du fouillis dans cet espace est le demi-ellipsoïde de la Figure 14 (on suppose l'absence de rayonnement arrière de l'antenne), dont la forme limite est un demi-plan dans le cas de la configuration latérale (Figure 15). La coupe à un angle d'élévation donné (c'est-à-dire une distance donnée) sur la Figure 15 correspond à la droite indiquée Figure 7 dans l'espace angle azimut-Doppler. Pour plus détail sur la représentation des caractéristiques angle-Doppler du fouillis de la Figure 14, se référer à (Richardson P.G, 1999)

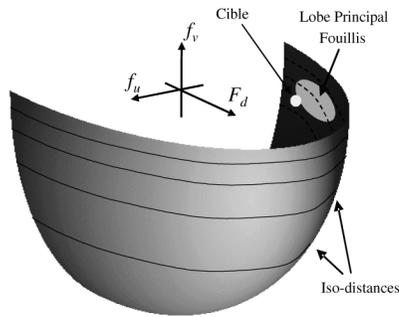


Figure 14. Localisation tridimensionnelle du fouillis

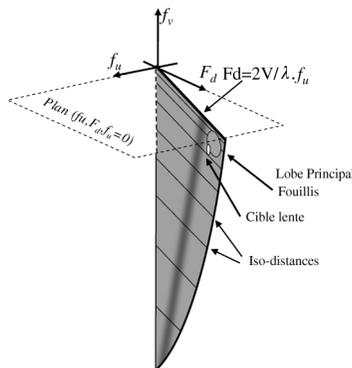


Figure 15. Localisation tridimensionnelle du fouillis – Configuration antenne latérale

La configuration antenne frontale génère donc une dépendance en distance de la loi reliant angle et Doppler pour les échos de fouillis. À cette non stationnarité en distance du fouillis, se rajoute le plus souvent la présence d'ambiguïtés distance, et dans tous les cas des hétérogénéités intrinsèques à la nature variable du fouillis observé. Cet aspect n'est pas sans conséquence pour l'apprentissage des coefficients adaptatifs du filtre STAP, qui devra être impérativement limité sur une faible zone distance (coefficients rapidement variables avec la distance). On note également qu'en toute rigueur le problème de l'élimination du fouillis dans ce cas (antenne frontale avec ambiguïtés distance) conduit à un filtrage STAP tridimensionnel pour éliminer le fouillis provenant des cases distance ambiguës. Dans la case distance de la cible se trouveront en effet superposés plusieurs anneaux de la Figure 14 correspondant aux retours de fouillis des cases distances ambiguës (repliement de la Figure 14 suivant l'axe vertical), qui pourront être éliminés par un filtrage spatio-temporel exploitant également l'angle d'élévation.

Revenons sur l'exemple présenté Figure 2 représentant la dégradation de la probabilité de détection en fonction de la localisation du fouillis ambiguë (lobes secondaires et lobe principal). Pour cette application air-air, où le fouillis est à la fois ambigu en distance et en fréquence une approche utilisant une estimation pré-Doppler suivi d'un filtrage Post Doppler a été suggérée comme un bon candidat (Le Chevalier *et al.*, 2009) et a été simulé et testé lors d'essais en vol dans le programme AMSAR.

Les résultats simulés (Figure 16) dans des conditions réalistes, mais en supposant connues les caractéristiques statistiques du fouillis (cas « clairvoyant ») montrent de nettes améliorations pour la détection de cibles en secteur travers (près du lobe principal en zone B) ainsi que dans la zone de fouillis des lobes secondaires (passe arrière en zone A). Une amélioration de la probabilité de détection peut également être constatée au niveau de la première ambiguïté vitesse (zone D) avec une homogénéisation de la performance de détection permettant l'utilisation de cette forme d'onde en mode recherche et poursuite (mode neutre).

Un exemple dans le cas adaptatif sur données réelles est présenté sur la Figure 17. La forme d'onde est identique au cas clairvoyant précédent mais la fréquence est compensée de la fréquence Doppler lié à la vitesse du chasseur.

On remarque sur ces 2 figures un résidu de fouillis dans la zone de la raie d'altitude (retour de sol à la vertical du porteur, pour un vol horizontal), non filtré par le traitement STAP. En effet dans cette zone la non stationnarité augmente très rapidement en fonction de la distance et l'obtention d'une référence pour la matrice de covariance difficile à obtenir en dehors de la case sous test.

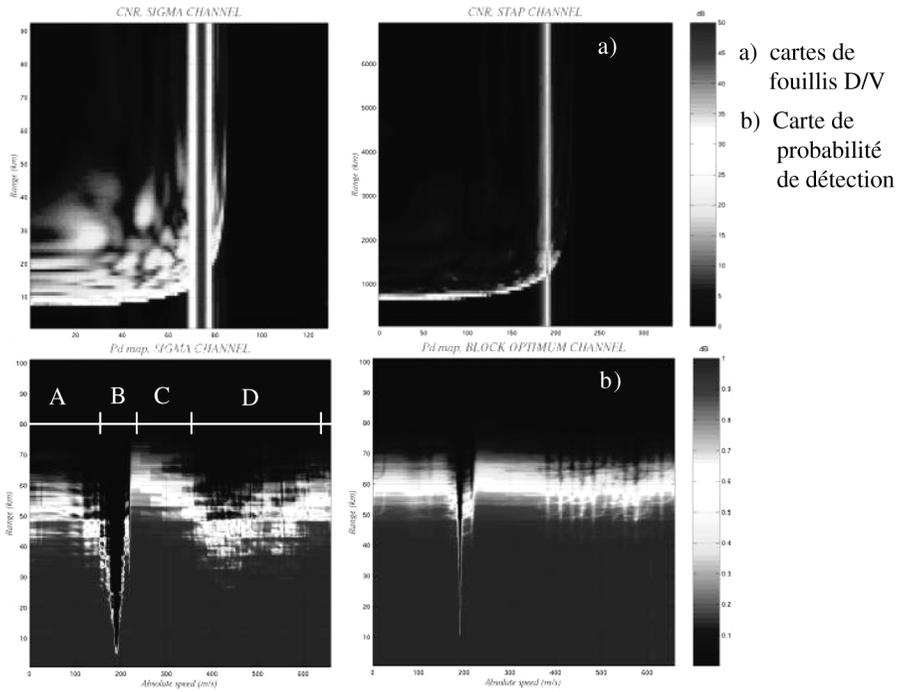


Figure 16. gauche : traitement classique / droite : traitement STAP (clairvoyant)

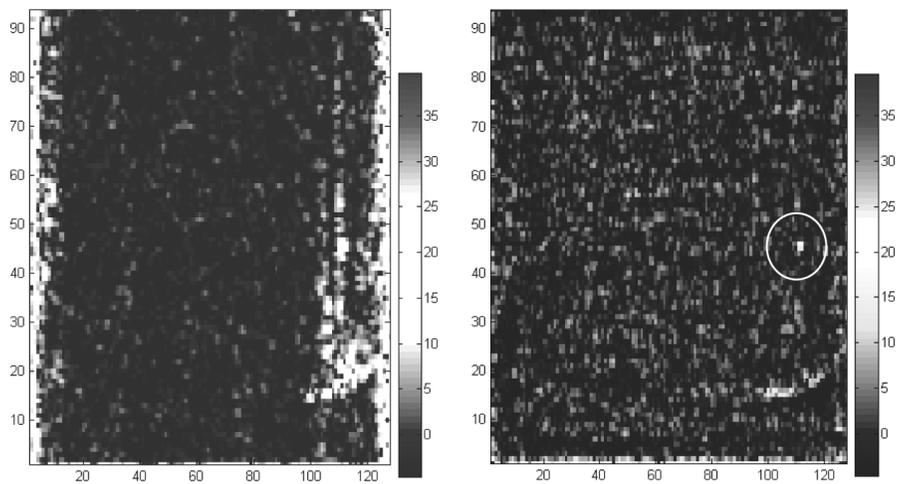


Figure 17. Mode MFR Traitement Doppler / Traitement STAP

3. Conclusion

Cet article a permis, après une brève évocation des différents domaines d'application des techniques STAP, d'analyser succinctement dans le cas des radars aéroportés différentes variantes de traitement. La nécessité de choisir une architecture combinant les dimensions spatiale et temporelle, ou angulaire et Doppler, est apparue, et quelques exemples de résultats ont été présentés. Les critères permettant de choisir les bonnes architectures ont été présentés dans l'article, et sont analysés en détail dans les références (F. Le chevalier et L Savy, 2009), et (L. Savy *et al.*, 2009).

D'une façon générale, ces traitements STAP sont particulièrement appropriés lorsque

- a) la répartition spatio-temporelle des parasites n'est pas isotrope,
- b) l'adaptation aux conditions particulières de l'emploi est nécessaire (pas de « bon modèle » *a priori*),
- c) une haute résolution est nécessaire pour séparer les signaux utiles des parasites.

Le cas du radar aéroporté est en quelque sorte emblématique de ces situations.

Bibliographie

- Bidon S. (2011). Introduction au STAP. Partie II : Modèle des signaux et principe du filtrage. *Revue Traitement du signal*, 2011.
- Brennan L.E., Reed I.S., (1973). Theory of adaptive radar. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 9, n° 2, p. 237-252.
- Carrie G., Vincent F., Deloues T., Piétin D., Renard A., Letestu F., (2006). Adapting STAP Processors to GNSS Receivers. *European Navigation Conference*.
- Doisy Y., Deruaz L., Van Ijsselmuide S.P., Beerens S.P., Been R., (2008). Reverberation Suppression Using Wideband Doppler-Sensitive Pulses. *IEEE J. Oceanic Engineering*, vol. 33, n°4.
- Kelly E.J., (1986). An adaptive detection algorithm. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 22, n° 1, p. 115-127.
- Klemm R., (2002). *Principles of Space-time adaptive processing*. London, UK, The Institution of Electrical Engineers.
- Lacomme Ph., Marchais J.C., Hardange J.P., Normant E., (2001). *Air and spaceborne systems: An Introduction*. SPIE
- Le Chevalier F., (2002). *Principles of radar and sonar signal processing*. Artech House.
- Le Chevalier F., Montécot M., Doisy Y., Letestu F., Chevalier P., (2009). STAP developments in Thales. *Radar conference Eurad 2009*.
- Le Chevalier F., Savy L., (2009). Traitements adaptatifs spatiotemporels en radar: une analyse relative des traitements radar STAP Pré-Doppler et Post-Doppler. *Techniques de l'Ingénieur*.
- Melvin W.L., (2004). A STAP overview. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol 19, Issue 1, Part 2, p 19-35.

- Nickel U., (2007). Detection with Adaptive Arrays with Irregular Digital Subarrays. *2007 IEEE Radar Conference*, 17-20, p 635-640.
- Paulraj A.J., Papadias C., (1997). Space-Time Processing for wireless Communications. *Signal Processing Magazine*, vol. 14, n°6, p.49-83.
- Pipon F., Chevalier P, Vila P., Monot JJ., (1997). Joint spatial and temporal equalization for channels with ISI and CCI – Theoretical and experimental results for a base station reception. *Proc. IEEE SP Workshop on Signal Processing advances in Wireless Communications*, SPAWC, Paris (France), p. 309-312.
- Richardson P.G., (1999). Space-time adaptive processing for manoeuvring airborne radar. *IEE Electronics and Communication Engineering Journal*, p. 57-63.
- Savy L., (2006). Benefits of Space-Time Adaptive Processing for Air to Air Operations. *Proc. CIE Int'l Conf of Radar (IEEE Press)*, Shanghai, China.
- Savy L., Richardson P., Medley J., Buerger W., (2009). The relative merits of pre/post-Doppler STAP, *Radar'09 international Conference*, October 12th-16th 2009, Bordeaux.
- Ward J., (1994). *Space-time adaptive processing for airborne radar*. Lincoln Laboratory MIT Technical report n° 1015.