

Détection et localisation de sources faibles par intégration long terme*

Laurent DERUAZ, Jean-Michel PASSERIEUX

Thomson Marconi Sonar SAS,
525, route des dolines, BP 157,
06903 Sophia Antipolis Cedex, France
deruaz@tms.thomson-csf.com, paserieux@tms.thomson-csf.com

Résumé – On présente une méthode d'intégration dynamique (ou de voies défilantes) long terme, applicable de manière panoramique en gisement et fréquence. Cette méthode permet d'améliorer les performances théoriques en détection BE sur des sources proches et silencieuses dont le gisement défile.

Abstract – A method for long term integration in passive Narrow band sonar is addressed. It theoretically leads to a significant gain for detecting quiet close moving sources.

1 Introduction

La méthode de détection habituelle en sonar passif (bande large ou bande étroite) consiste à intégrer sur une durée T l'énergie reçue pour chaque direction et canal fréquentiel (en BE) d'un maillage a priori (gain temporel en $T^{1/2}$), puis à détecter en recherchant des maxima.

Les performances en détection de cette méthode sur des sources faibles et en mouvement sont donc limitées par le mouvement de ces sources (durée d'intégration T inférieure au temps de séjour dans une voie et/ou un canal fréquentiel). Une idée naturelle [1, 2, 3] pour augmenter la durée d'intégration T (et le gain temporel) consiste donc à prendre en compte le mouvement pendant l'intégration, c'est à dire à mailler l'espace des trajectoires possibles, puis à intégrer l'énergie reçue le long des chemins correspondants avant de rechercher des maxima.

Après quelques rappels sur le principe de cette méthode (section 2), cet article aborde principalement les problèmes pratiques liés à sa mise en œuvre panoramique dans des situations multi-sources : calcul de la fonction d'ambiguïté et maillage optimal nécessaire pour conserver une charge de calcul raisonnable (section 3), puis algorithmes de tri/rejet des fausses alarmes sur maxima locaux parasites (utilisation de la médiane, coïncidences en gisement et fréquence, section 4). Quelques résultats sur signaux réels sont finalement présentés en section 5.

2 Aspects théoriques

2.1 Hypothèses et notations

L'observateur et les sources à détecter sont animés d'un mouvement rectiligne uniforme (MRU) dans un même plan horizontal (voir figure 6). Dans un référentiel X-Y lié à l'observateur la trajectoire d'une source est donc caractérisée par x_0, y_0 (position à un instant de référence t_0) et V_r et V_o (composantes radiale et ortho-radiale de sa vitesse relative par rapport à l'observateur).

On suppose par ailleurs que la source émet un signal bande étroite à une fréquence f_0 inconnue a priori. Le signal reçu sur les K capteurs de l'antenne qui équipe l'observateur est donc : $s_k(t) = A(t)e^{2\pi if(t-\tau_k)}$, avec $A(t)$ aléatoire gaussien de bande Δf et $f = (1 + V_r/c)f_0$ (effet doppler).

La première étape des traitements est une formation de voies Bande Etroite : 1) découpage en canaux fréquentiels de largeur Δf , par transformée de fourier (FFT) de durée $T_{fft} = 1/\Delta f$, 2) formation de voies classique en gisement θ (par déphasage), 3) calcul du module carré et intégration sur une durée T_1 (limitée par le mouvement de la source). A la récurrence t , la sortie de cette première étape est donc une version échantillonnée $P_t(\theta_k, f_i)$ de la réponse idéale $P_t(\theta, f)$ (avec θ_k, f_i gisements des voies calculées et fréquences centrales des canaux FFT).

La fonction d'ambiguïté de ce traitement classique est donnée par (pour antenne linéaire à capteurs équidistants et sans pondération).

$$v(f, \nu, f_0, \nu_0) = E(P(\theta, f)) = N \sin_{c_M}^2 [\pi (f - f_0) T_{fft}] \sin_{c_K}^2 \left[\pi (f \cos \theta - f_0 \cos \theta_0) \frac{L}{c} \right]$$

*travaux financés pour une grande part par la DCE (CTSN/SSTA/SNR, le Brusac, France)

avec $\sin_{c_N}(u) = \frac{\sin(u)}{N \sin(\frac{u}{N})}$

2.2 Principes des “Voies défilantes”

Lorsque l’observateur et la source sont en mouvement relatif f et θ varient avec le temps t ce qui limite la durée d’intégration. L’idée à la base de la méthode abordée ici consiste donc à mailler l’espace des trajectoires et fréquences d’émission possibles des sources, à calculer à chaque récurrence t_i et pour tous les points X de ce maillage les gisements $\theta(X;t)$ et fréquences $f(X;t)$ correspondants, puis à intégrer la sortie du traitement classique $P_i(\theta, f)$ le long des chemins correspondants et finalement à détecter les sources présentes sur les max de cette nouvelle fonction. Soit

$$P(X) = \sum_i P_{t_i}(\theta(X;t_i), f(X;t_i)) \quad (1)$$

En pratique on s’aperçoit qu’un modèle de défilement approché à peu de paramètres (par exemple à 4 paramètres comme $(f_0, \theta_0, f_0, \theta_0)$) est rapidement faux pour des cibles fortement défilantes et ne permet pas une intégration de plus de quelques minutes. On a donc retenu ici un modèle à cinq paramètres basé sur la trajectoire de la cible dans le plan X-Y (4 paramètres) et d’une de ses éventuelles fréquences d’émission propre, à savoir $X = (f_e, x_0, y_0, V_x, V_y)$. La validité de ce modèle est bien meilleure, puisque limitée uniquement par les manœuvres des sources.

L’expression de la fonction d’ambiguïté correspondante (dans un espace 5D) se déduit directement de celle du traitement classique (cf. ci-dessus).

3 Problèmes de maillage

3.1 Choix du système de coordonnées

L’approche la plus simple consiste naturellement à utiliser un maillage à cases équidistantes après passage dans un système de coordonnées $\{x_i, i = 1, 5\}$ adéquat, déduit de $X = (f_e, x_0, y_0, V_x, V_y)$ par changement de variables. Le pas Δx_i du maillage selon l’axe x_i doit alors être tel que :

$$\Delta x_i \leq C_1 \cdot (2x_i)_{3\max} \quad (2)$$

avec $(2x_i)_{3\max}$, largeur à 3 dB du lobe de la fonction d’ambiguïté selon l’axe x_i dépendant de l’inclinaison du lobe par rapport aux axes, et C_1 une constante de l’ordre de un. On constate alors assez vite qu’un maillage équiréparti en distance est peu efficace du point de vue de la masse de calcul. Avec le système de coordonnées $(f_0, R, \cos \theta, V_r, V_o)$ (déjà mieux que f_e, x_0, y_0, V_x, V_y), les largeurs à 3dB du lobe de la fonction d’ambiguïté varie en effet d’un facteur 1 à 10 pour des distances allant de 5 km à l’infini et des vitesses de 0 à 20 nœuds.

Cette variation est beaucoup plus faible avec un système de coordonnées en $1/R$, par exemple $(f_0, \frac{V_o}{R}, \cos \theta, \frac{V_r V_o}{R}, \frac{V_r^2}{R})$ (expressions déduites de la forme

des dérivées premières et secondes de la fonction d’ambiguïté). Avec ce nouveau système de coordonnées on a en effet :

$$\begin{aligned} (2f_{03})^2 &\simeq \frac{f^2}{4\alpha_1} \frac{16\alpha_2 + 81\alpha_1 V_o^2}{4\alpha_2 + 9\alpha_1 V_o^2} \\ \left(2 \left[\frac{V_o}{R}\right]_3\right)^2 &\simeq \frac{12}{\alpha_2} \frac{c^2}{T^2} \\ (2\theta_3)^2 &\simeq \frac{9c^2}{\alpha_2} \frac{\alpha_2 + \alpha_1 V_o^2}{4\alpha_2 + 9\alpha_1 V_o^2} \\ \left(2 \left[\frac{V_r V_o}{R}\right]_3\right)^2 &\simeq \frac{720}{T^4} \frac{c^2}{4\alpha_2 + 9\alpha_1 V_o^2} \\ \left(2 \left[\frac{V_o^2}{R}\right]_3\right)^2 &\simeq \frac{12}{\alpha_1 T^2} \end{aligned}$$

et les largeurs à -3 dB du lobe de la fonction d’ambiguïté varient seulement d’un facteur 1 à 2 ou 3 (toujours pour $5 \text{ km} \leq R \leq \infty$ et $0 < V \leq 20$ nœuds).

3.2 Maillage proprement dit

Pour redresser et rendre sphérique la coupe à -3dB du lobe de la fonction d’ambiguïté, on procède finalement aux opérations suivantes :

1. Découpage de l’espace 5D de ce nouveau jeu de paramètres au moyen d’une macro-grille formée de macro-cases de dimensions fixes.
2. Dans chaque macro-case de cette macro-grille on suppose que la fonction d’ambiguïté varie peu. On la redresse alors localement en prenant des axes orientés selon les vecteurs propres de la matrice de Fisher calculée en un point choisi de la macro-case.
3. On parcourt finalement les espaces redressés de chaque macro-case par un maillage assurant une couverture optimale par des hypersphères (équivalent 5D d’un maillage à maille hexagonal en 2D [4]) de diamètre égal à la largeur à -3 dB de la fonction d’ambiguïté redressée [†].

NB : Il faut remarquer que, même avec les précautions ci-dessus, le nombre de cases du maillage reste très important, de l’ordre de 10^8 dans les conditions des validations sur signaux réels de la section 5.

4 Réjection des maxima locaux parasites

La dernière étape (détection proprement dite) du traitement consiste simplement à rechercher les maxima locaux supérieurs à un seuil η . On constate cependant que, même sur signaux simulés, une source unique se manifeste par de très nombreux maxima locaux, de niveaux relativement importants (quelques dB seulement sous celui du maximum absolu).

[†]avec une réduction d’un facteur 4.34 par rapport à un maillage classique formé d’hypercubes de dimension 5

Certains de ces maxima sont purement factices. Ils apparaissent uniquement lorsque le lobe de la fonction d'ambiguïté est incliné et que la finesse du maillage est juste suffisante (i.e égale ou proche de la largeur à -3dB du lobe). La technique de redressement du maillage décrite ci-dessus permet de réduire fortement le nombre de ces maxima locaux factices.

D'autres maxima indésirables correspondent à des "filaments" à amplitude quasi-constante, visibles sur les coupes de la fonction d'ambiguïté 5D, et dont le niveau ne descend que très lentement lorsqu'on s'éloigne du maximum absolu de la fonction d'ambiguïté. Une bonne partie de ces maxima parasites peut être éliminée en rejetant les maxima locaux qui correspondent à des trajectoires dans l'espace f, θ se rapprochant à moins de $2\theta_3$ à la fois en fréquence et en gisement d'une autre détection de puissance supérieure.

De plus, l'emploi de la médiane en lieu et place de l'intégration (ou moyenne) réduit très fortement le niveau des maxima secondaires de la fonction d'ambiguïté : le contraste de la fonction d'ambiguïté est très fortement amélioré (-60dB au lieu de -20dB avec la moyenne)[‡].

5 Validation sur signaux réels

5.1 Signaux & traitements utilisés

Les signaux réels utilisés pour valider les traitements décrits ci-dessus ont été recueillis en Méditerranée sur une antenne linéaire remorquée à capteurs équidistants (de longueur $\leq 25\lambda$). L'observateur se déplaçait à 10 nd en présence de deux sources coopératives de trajectoires connues (toutes deux à 5 nd et environ 18 km). La source 2 est de plus équipée d'un bruiteur synthétique qui transmet deux raies BE fortes de fréquences connues.

Les principaux paramètres du traitement classique sont les suivants : $\Delta f = 0.47$ Hz (largeur des canaux fréquentiels), avec une pré-intégration sur une durée $T_1 = 4.26$ secondes.

L'intégration par "voies défilantes" se fait sur une durée de 15 minutes (gain théorique d'environ 10 dB). La détection est panoramique en gisement et se fait dans une bande de 100Hz[§].

5.2 Résultats obtenus

Les résultats obtenus (traitement BE classique et voies défilantes) sont présentés figures 1 à 5 et 7 à 12.

La première ligne de ces figures comprend un tracé de l'ensemble des détections en sortie de traitement classique BE dans le plan gisement/temps, suivi d'un

[‡]L'utilisation de la médiane permet en sus la réjection de signaux parasites pouvant perturber la détection en conditions réelles mais a néanmoins pour inconvénient une chute du rapport signal/bruit de l'ordre de 1.25 dB (par rapport à la moyenne).

[§]Pour mémoire la masse de calculs nécessaires pour ces traitements est de l'ordre de 2 Teraflops, ce qui correspond à 30h de calcul sur PC (Pentium II 266 MHz) et 12h sur une SUN 4 processeurs.

tracé identique avec superposition de la sortie des voies défilantes (trait plein), et d'un tracé de la sortie des voies défilantes dans le plan XY (trajectoires correspondants aux détections). On constate figures 2 et 3 que la méthode de voies défilantes a permis la détection de plusieurs nouvelles sources (dont la source indiquée par la flèche 'x' sur la figure 2), difficilement visible figure 1.

Les figures suivantes donnent le détail fréquentiel des détections relatives aux sources désignées par 1, 2 ou x sur la figure 2. Pour ces tracés, seul le secteur de gisement centrés sur la source et de largeur $2\theta_3$ est pris en compte : on trouve à gauche le tracé dans le plan fréquence/temps des détections BE, au centre, idem avec superposition de la sortie des voies défilantes et à droite tracé dans le plan X-Y des trajectoires correspondantes. On constate par exemple (figure 5) que l'algorithme des VDF a permis une détection sans équivoque des raies f_1 (forte) et f_2 (faible) étudiées dans l'article [3].

Le gain en détection avec les voies défilantes est par ailleurs particulièrement net pour la source x figures 10 et 11 (nombreuses raies détectées figures 11 en sortie de VDF, indiscernables figure 10 en sortie de traitement BE classique). On ne disposait pas d'information sur le spectre du signal émis par la source x. La cohérence des trajectoires correspondantes dans le plan X-Y (figure 12) semble néanmoins indiquer que ces nouvelles détections ne sont pas des fausses alarmes ou des artéfacts mais sont bien dues à la source x.

6 Conclusions

On a présenté et mis en œuvre sur signaux réels une méthode d'intégration dynamique (ou de voies défilantes) long terme (typiquement 15 minutes), applicable de manière panoramique en gisement et fréquence, qui permet d'améliorer les performances théoriques en détection BE. Ce gain théorique a pu être mis en évidence sur signaux réels recueillis en mer.

Références

- [1] B.H.MARANDA & J.A.FAWCET, "Detection and Localisation of Weak Targets by Space-Time Integration", *IEEE journal of Oceanic engineering*, vol 16, no 2, avril 1991.
- [2] M.SOLAL & D.PILLON & S.BRASSEUR, "Simultaneous Detection and Target Motion Analysis from Conventional Passive Beamforming Output", *Proc. ICASSP 91*, Toronto, May 14-17,1991,pp 1321-1324
- [3] S.SITBON & P. BLANC-BENON, "Intégration dynamique en sonar passif : détection et localisation simultanées de sources faibles", *Traitement du signal*, Spécial 1996, vol 13, No 5.
- [4] J.H. CONWAY & N.J.A. SLOANE, "Sphere packing, lattices and groups", *New York, Springer-Verlag*, 1993.

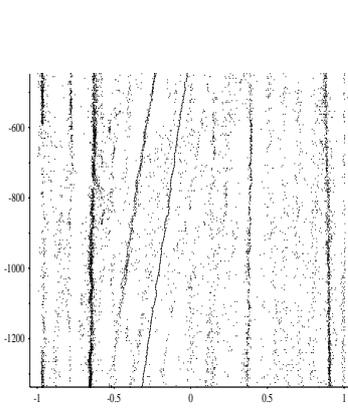


Figure 1

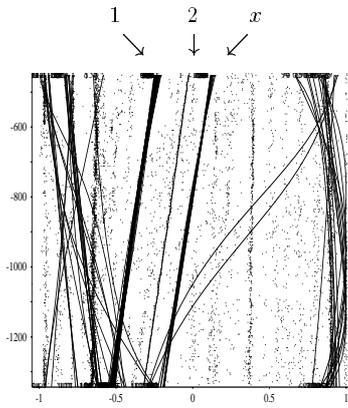


Figure 2

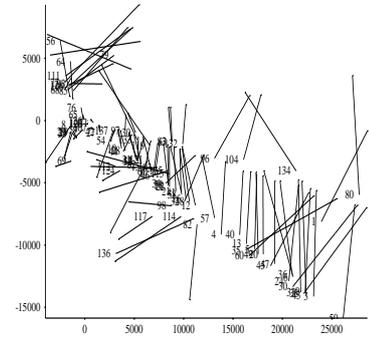


Figure 3

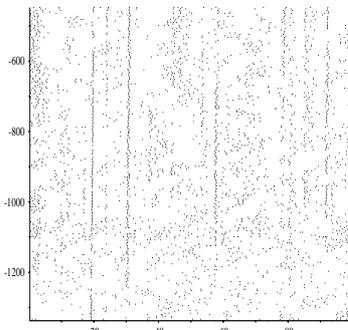


Figure 4: cible 1

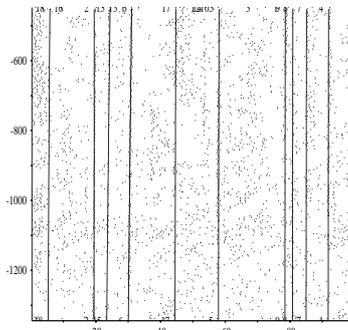


Figure 5: cible 1

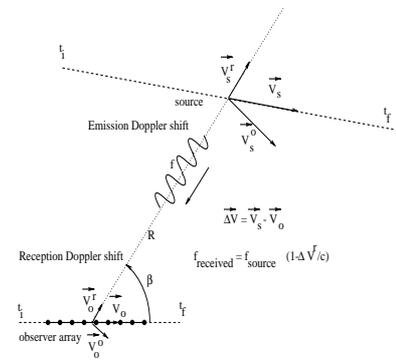


Figure 6

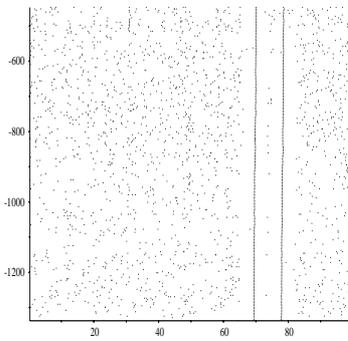


Figure 7: cible 2

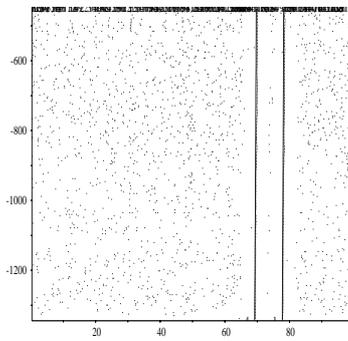


Figure 8: cible 2

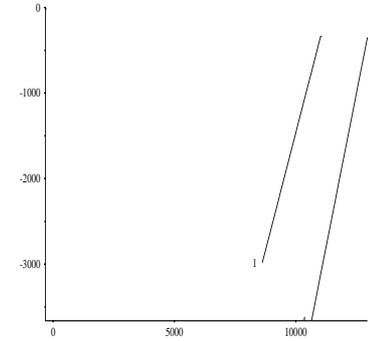


Figure 9: cible 2

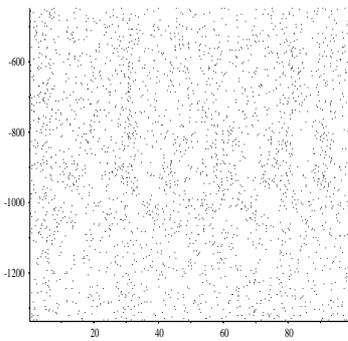


Figure 10: cible x

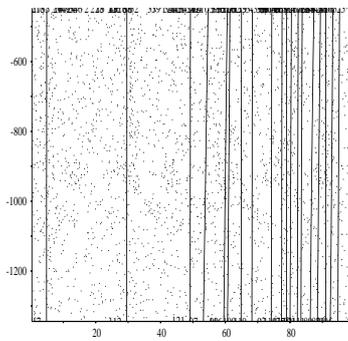


Figure 11: cible x

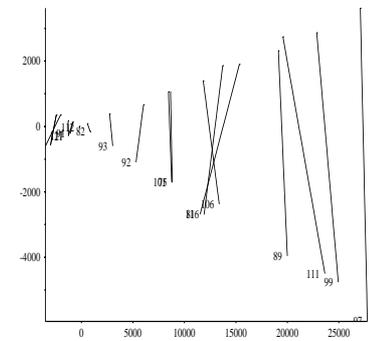


Figure 12: cible x