

SYNTHESE D'OUVERTURE EN ACOUSTIQUE SOUS-MARINE : INFLUENCE DE L'EFFET DOPPLER DIFFERENTIEL.

J. CHATILLON¹, M.E. ZAKHARIA¹ et M.E. BOUHIER²

¹I.C.P.I. Lyon, L.A.S.S.SO., 25 rue du Plat, 69288 Lyon cedex 02, FRANCE.

²IFREMER, Centre de Toulon, B.P. 330, 83507 La Seyne/Mer cedex, FRANCE.

RÉSUMÉ

Lors de la formation d'une antenne synthétique en acoustique sous-marine, la variation de vitesse relative sonar-fond entraîne des variations de phase des signaux en sortie de filtrage adapté. On se propose d'évaluer et de comparer la dégradation de la qualité de l'image due à cet effet dans le cas où l'on tient compte de la phase des signaux pour former l'antenne synthétique et celui où l'on ne tient compte que de l'intensité des signaux.

1. Introduction

Dans le cadre de l'imagerie acoustique des fonds marins par sonar latéral actif, nous envisageons d'utiliser des signaux large-bande pour obtenir, par synthèse d'ouverture [1], [2], des images du fond à haute résolution azimutale. L'utilisation de tels systèmes présente plusieurs avantages [3], [4]. L'élargissement de la bande permet par lissage des fréquences spatiales des lobes latéraux de l'antenne synthétique [8], d'améliorer la résolution azimutale. La richesse spectrale des échos reçus ouvre la perspective de classification des fonds par analyse de signature.

Nous avons développé un logiciel de simulation pour mieux connaître les limites de la synthèse d'ouverture quand les mouvements de la plate-forme sonar deviennent erratiques. Les performances sont chiffrées par la résolution obtenue dans le cas de plusieurs cibles ponctuelles localisées sur le fond. Nous calculons d'abord les échos reçus le long d'une trajectoire perturbée de la plate-forme sonar. Nous appliquons ensuite à ces données un filtrage adapté en azimut (synthèse d'ouverture) en considérant une trajectoire parfaite (rectiligne uniforme). Les images obtenues sont d'abord visualisées puis analysées en

ABSTRACT

When using synthetic aperture sonar for sea floor imaging, we have to deal with differential Doppler effect due to the translation movements of the towed array. This effect can be considered, after matched filter, as a phase variation. We will investigate the high resolution images damage for two cases : one taking into account these phase variations and the other achieving synthetic aperture processing on signal intensity.

effectuant des coupes selon la direction de l'azimut afin d'obtenir des informations quantitatives sur la qualité des images.

2. Effet Doppler différentiel.

Pendant le temps de formation de l'antenne synthétique, la distance de l'antenne physique à un diffuseur observé varie, ainsi que sa dérivée temporelle (*i.e.* vitesse radiale sonar-cible). Ceci induit une compression ou une dilatation en temps des échos reçus. Ce taux Doppler est donc fonction de la position de la plate-forme. Cet effet Doppler différentiel est maximal aux extrémités de l'antenne synthétique, nul à son centre (figure 1). La vitesse radiale maximale en bout d'antenne s'écrit :

$$V_r \max = V \sin(\theta_a/2) \approx V \lambda / 2 L_T$$

où V est la vitesse de translation de la plate-forme sonar, θ_a l'ouverture de l'antenne physique, λ la longueur d'onde à la fréquence de focalisation et L_T la longueur de l'antenne physique.

En présence d'effet Doppler, la sortie du filtre adapté n'est plus la fonction d'auto-corrélation (décalée du retard de propagation) du signal émis mais une coupe de la fonction d'ambiguïté large-bande (ou de Kelly-Wishner).



Pour des signaux Doppler-tolérants à modulation hyperbolique de fréquence, on montre que la fonction d'ambiguïté en compression comporte un terme explicite de phase dû à l'effet Doppler [5], [6], l'enveloppe restant maximale à la date d'arrivée de l'écho (figure 2) :

$$\phi = \alpha T f_0 \text{Log}(\eta)$$

où α est une constante ne dépendant que la bande relative du signal, T sa durée, f_0 sa fréquence centrale et η le taux de compression. Si la vitesse radiale reste faible devant la célérité des ondes, la phase maximale obtenue en bout d'antenne synthétique peut s'écrire :

$$\phi_{\max} = \alpha T V/L_r$$

La vitesse radiale s'annulant quand l'antenne physique est au centre de l'antenne synthétique, la phase s'annule avant de changer de signe, variant a total de $-\phi_{\max}$ à $+\phi_{\max}$. Cet effet Doppler différentiel est donc un élément perturbateur de la cohérence temporelle des échos reçus durant le temps de formation de l'antenne synthétique.

Nous étudierons l'effet de cette variation de phase sur les images obtenues par synthèse d'ouverture. En sortie de filtre adapté, le module étant très peu perturbé par l'effet Doppler (faible perte de contraste) nous considérerons aussi les résultats de la synthèse d'ouverture appliquée au module des échos reçus.

3. Synthèse d'ouverture cohérente.

Considérons la configuration sonar suivante pour les simulations :

- une ou deux cibles situées à une distance $R \approx 500$ m;
- signal large-bande $f_0 = 12$ kHz, bande (à -3 dB): 1 octave (8 kHz), durée $T = 100$ ms;
- antenne physique $L_r = 4$ m;
- résolution azimutale théorique obtenue par ouverture synthétique $\delta_{sa} = L_r/2 = 2$ m;
- vitesse porteur $V = 1$ à 8 m/s;

En partant d'une vitesse de porteur très faible, nous allons l'augmenter jusqu'à atteindre une dégradation de l'image.

Trois cas se présentent alors selon la variation maximale de phase ϕ_{\max} :

a) $0 < |\phi_{\max}| < \pi/2$

la dégradation de l'image est peu importante (figure 3); la résolution obtenue est meilleure que $1,25 \delta_{sa}$ (au lieu de δ_{sa} pour $|\phi_{\max}| = 0$).

b) $\pi/2 < |\phi_{\max}| < \pi$, la réponse d'une cible isolée comporte des lobes secondaires dont l'amplitude augmente avec ϕ_{\max} . La largeur du lobe principal

augmentant par ailleurs, la résolution est dégradée d'un facteur pouvant atteindre plusieurs unités: $4\delta_{sa}$ pour $|\phi_{\max}| = \pi$.

c) $\pi < |\phi_{\max}| < 2k\pi$, on assiste à la formation de plusieurs "échos fantômes", symétriquement placés autour de la position réelle de la cible tandis que cette dernière est complètement occultée (figure.4) Ceci provient de la symétrie du problème qui induit une phase nulle pour la distance sonar-cible minimale et deux phases opposées pour deux distances égales et symétriques.

En conclusion, la résolution azimutale obtenue reste proche de la résolution théorique $\delta_{sa} = L_r/2$, à condition que la phase ne dépasse pas $\pi/2$ en bout d'antenne. Dans le cas considéré ceci nous conduit à une vitesse limite de 8 m/s. Pour des vitesses plus importantes, il faudra alors compenser ces variations de phase dont on peut connaître l'expression analytique; ceci conduit à une augmentation importante de la complexité des architectures de traitement à utiliser. On se propose donc d'explorer une seconde voie, couramment utilisée en astronomie: la synthèse d'ouverture non cohérente.

4. Synthèse d'ouverture non cohérente.

Dans le cas où l'on ne considère que le module des signaux pour effectuer le calcul d'antenne synthétique, le récepteur associé est sous-optimal [7], la dégradation théorique des performances est de l'ordre de deux (pour une octave) [7].

Dans le cas de signaux à modulation hyperbolique de fréquence, les simulations montrent que la dégradation effective de la résolution en azimut est de l'ordre de trois, pour une octave (figure 5).

Dans ce cas, l'utilisation de signaux Doppler-tolérants permet de pallier à tout problème de cohérence, le long de la trajectoire de formation de l'antenne synthétique, lié à l'effet Doppler. Les pertes de performances seront les mêmes quelle que soit la vitesse (en négligeant la perte de contraste en sortie de filtre adapté).

Pour une application donnée, le choix de la méthode à utiliser sera fonction de l'ordre de grandeur du déphasage maximal en bout d'antenne ϕ_{\max} . Ce choix dépendra de la vitesse limite d'utilisation et de la complexité relative des architectures de traitement associées. Si nous envisageons un signal de durée $T = 100$ ms, d'une octave, de fréquence centrale $f_0 = 12$ kHz, cette phase varie de 5° à 290° pour des vitesses

de translation variant de 1 à 10 noeuds et des antennes physiques de longueur entre 1 et 5 mètres.

Le choix de la méthode de calcul (enveloppe ou module et phase) peut aussi être guidé par sa robustesse vis à vis des perturbations de trajectoire. Nous avons montré [3], [4] que, dans le cas de perturbations périodiques de la trajectoire et pour un système large bande (une octave), la limite tolérable reste de l'ordre de $\lambda/8$. Dans le cas d'un traitement non cohérent, diverses simulations montrent que cette limite est alors ramenée à λ , la longueur d'onde correspondant à la fréquence la plus élevée. Cette méthode est donc beaucoup plus robuste, devant la perte de cohérence temporelle des échos, que celle utilisant la phase des signaux.

5. Conclusion.

La spécificité des signaux sonar permet de séparer, lors du traitement, le filtrage adapté temporel et le filtrage adapté azimutal. La présence d'effet Doppler conduit à réaliser une focalisation dynamique (compensation des retards relatifs de propagation) sur des coupes de la fonction d'ambiguïté en compression.

Pour des configurations sonar classiques en imagerie et des vitesses de remorquage raisonnables, les essais réalisés ont montré que l'optimisation du choix des signaux utilisés permettait de réduire l'influence de l'effet Doppler différentiel sur les performances en résolution de la synthèse d'ouverture (perte de performances inférieure à 20%).

Pour des vitesses plus élevées, ce choix n'est plus suffisant. La solution optimale consiste à compenser les déphasages induits (en plus de la compensation des retards). Ceci conduit à une augmentation considérable de la complexité du traitement qui devra inclure une batterie de déphaseurs purs.

La solution sous-optimale consistant à effectuer la le calcul d'antenne synthétique sur l'enveloppe de sortie de filtre adapté permet de simplifier ce traitement tout en conduisant à une perte de performance qui sera d'autant plus petite que la bande sera large (perte d'environ trois pour une octave). Il est intéressant de noter que cette perte est indépendante de la vitesse, si l'on néglige la perte de contraste en sortie de filtre adapté. De plus cette technique offre l'avantage de procurer une meilleure tolérance aux perturbations de trajectoire (tolérance d'une amplitude de perturbation près de huit fois supérieure, pour une octave).

Ces diverses simulations ont montré l'intérêt d'une technique de synthèse non cohérente, déjà envisagée par certains auteurs [7]. Cet intérêt reste à confirmer lors d'essais en cuve puis d'essais en mer en cours de préparation.

6. Remerciements.

Ce travail est soutenu par la Communauté Européenne, DG XII, programme M.A.S.T., projet A.C.I.D.

7. Références.

- [1] L.J. CUTRONA: "Comparison of sonar system performance achievable using synthetic aperture techniques with the performance achievable by more conventional means." *J.Acoust. Soc. Am.*, august 1975, Vol. 58, N°2. pp. 336-348.
- [2] H.E. LEE: "Extension of the synthetic-aperture Radar techniques to undersea applications." *IEEE Journal of oceanic engineering*, april 1979, Vol oe-4, N°2. pp. 60-64.
- [3] J. CHATILLON, M.E. ZAKHARIA, M.E. BOUHIER: "Synthetic aperture sonar : wideband vs narrowband". *U.D.T. Conference*, Paris (Fr), April 1991, pp 1220-1225.
- [4] M.E. ZAKHARIA, J. CHATILLON, M.E. BOUHIER: "Synthetic aperture sonar : a wideband approach.". *I.E.E.E. Ultrasonics Symposium*, Honolulu Hawaii (USA), December 1990, pp 1133-1136.
- [5] M.E. ZAKHARIA, J.M. PEY: "Détection et comptage de poissons par sonar haute fréquence ; possibilités de reconnaissance des espèces et d'estimation de la taille." *9ème colloque sur le Traitement du Signal et ses Applications*, Nice (Fr.), mai 1983. pp. 753-761.
- [6] A. GUIGAL: "Performances du filtrage adapté en présence de Doppler quelconque." *Rapport de D.E.A.*, septembre 1990, I.N.P. Grenoble.
- [7] P. de HEERING: "Suboptimal processing in synthetic-aperture sonar." *9ème colloque sur le Traitement du Signal et ses Applications*, Nice (Fr.), mai 1983. pp. 679-684.
- [8] M.E. ZAKHARIA, J.P. CORGIATTI, F. JOLY et R. PERSON "Description et performances d'un sondeur de pêche large-bande (20 kHz à 80 kHz)." *Colloque de Physique, Colloque C2, supplément au N°2, Tome 51, Février 1990*, 1er Congrès Français d'Acoustique, Lyon (France), 1990, pp. 329-332.

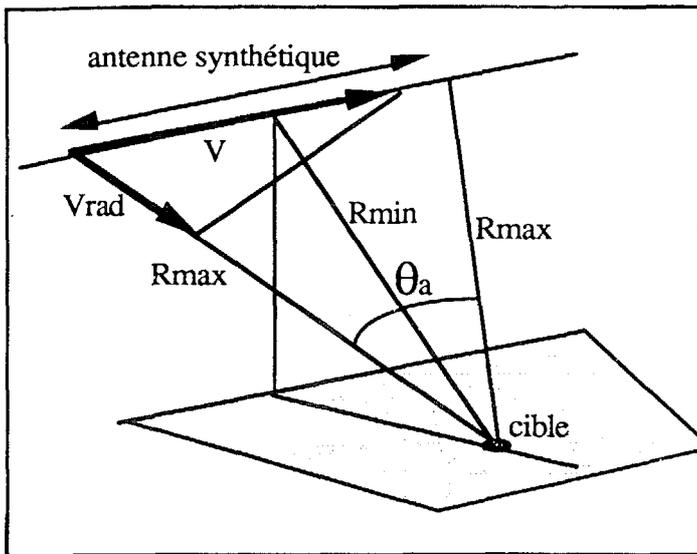


Figure 1: Géométrie de la variation de la vitesse radiale sonar-cible.

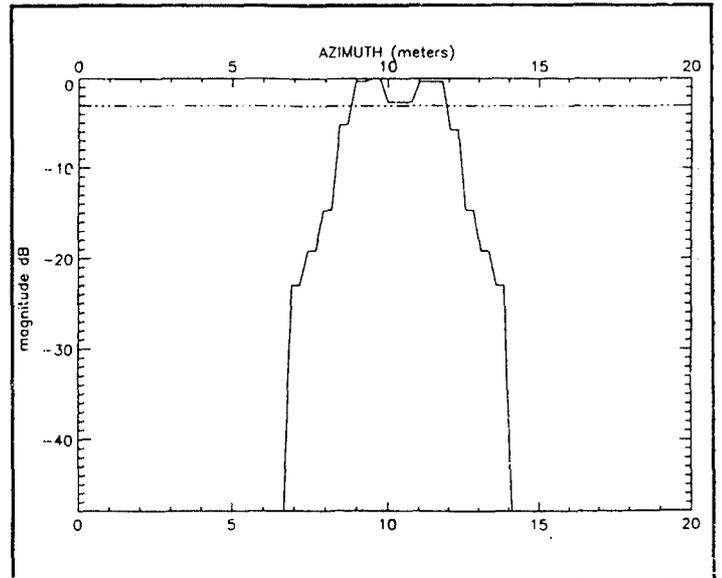


Figure 3: Coupe en azimuth pour 2 cibles en limite de résolution pour une variation de phase $\phi_{max} \approx \pi/4$

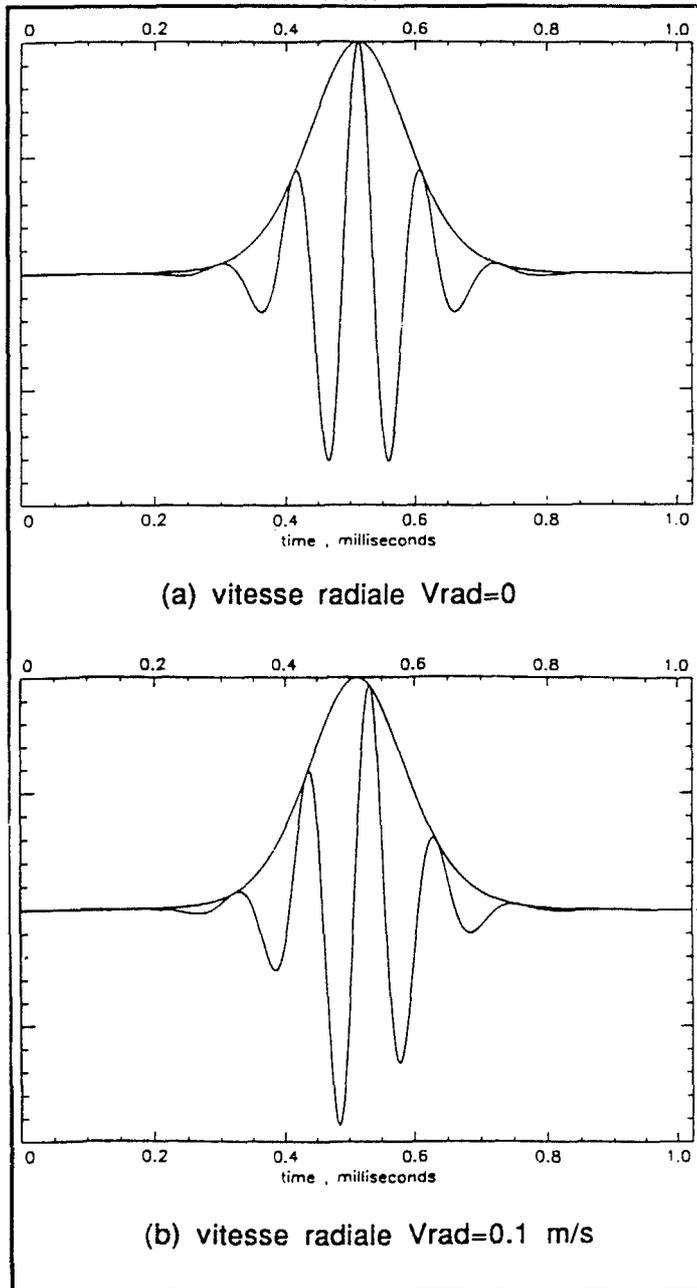


Figure 2: auto-corrélation (et son module) des signaux Doppler-tolérants, sans(a) et avec(b) compression

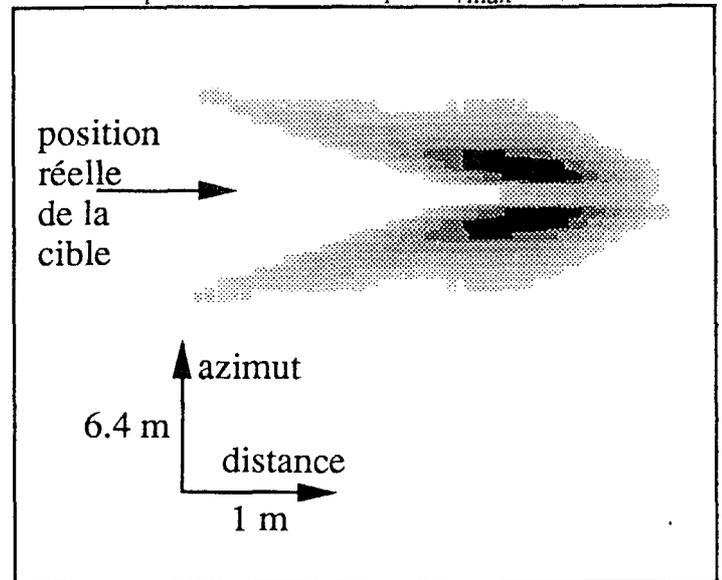


Figure 4: Image d'une seule cible pour une variation de phase $\phi_{max} \approx 2\pi$: échos fantômes et cible occultée

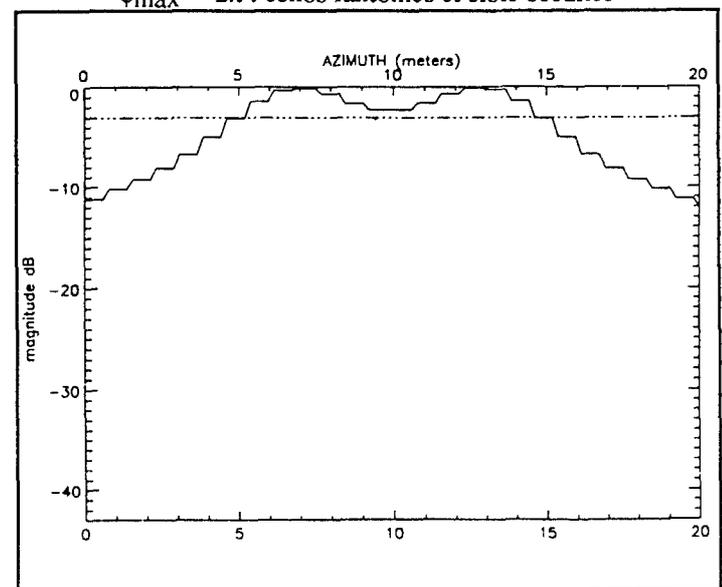


Figure 5: Coupe en azimuth pour 2 cibles en limite de résolution pour un calcul non-cohérent