



ESTIMATION DE PARAMETRES DE CIBLES MOBILES EN SONAR ACTIF LARGE BANDE

J.P. HENRIOUX, G. JOURDAIN, E. COLLET, E. LECOQ

Centre d'Etude des Phénomènes Aléatoires et Géophysiques
Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs Electriciens de Grenoble
Domaine universitaire, B.P. 46, 38402 Saint-Martin-d'Hères

RESUME:

Nous présentons les résultats de mesures faites pour tester la précision de la localisation angulaire de points brillants de cibles mobiles en sonar actif large bande. La méthode utilise des signaux très résolvents en temps-fréquence et une antenne comportant au moins 2 centres de phase. Les signaux très résolvents permettent d'identifier des points brillants dans la cible par interambiguïté émis-reçu. L'utilisation de 2 capteurs permet d'obtenir 2 images d'interambiguïté dont on exploite la phase. La localisation angulaire est déduite des mesures des différences de temps d'arrivée. Cette méthode originale permet de s'affranchir de la quantification temporelle introduite, dans le cas pratique, par l'échantillonnage des signaux. Les résultats de mesure montrent que nous obtenons la précision angulaire maximale qui résulte du rapport signal à bruit et de la bande efficace du signal avec sa porteuse, même en présence d'un déphasage entre enveloppe complexe et porteuse introduit par la propagation.

1. INTRODUCTION:

Les mesures présentées ici ont été faites dans le cadre d'une expérimentation destinée à la caractérisation de cibles mobiles complexes en sonar actif large bande. Les signaux utilisés possèdent un bon pouvoir séparateur qui permet d'identifier les points brillants de la cible. La caractérisation est réalisée tout d'abord par une imagerie temps-fréquence et ensuite par une reconstitution géométrique déduite d'une localisation spatiale de chacun des points brillants représentant la ou les cibles mobiles. Dans ce qui suit, nous nous intéressons surtout à l'étude de la **précision de la localisation angulaire de points brillants**. Nous avons, pour cela, étudié les fluctuations du site et du gisement de points réfléchissants fixes situés sur le fond [6]. Pour réaliser une bonne caractérisation, nous devons choisir le signal [1], la méthode de traitement [2] et la configuration de l'antenne [7]. Le choix d'une configuration d'antenne en plusieurs centres de phase permet de privilégier la précision angulaire (éventuellement au détriment du pouvoir séparateur) qui est moins important en sonar actif. La méthode pratique utilisée permet de supprimer l'effet de quantification temporelle introduite par l'échantillonnage des signaux sans introduire un coût de calcul supplémentaire [6]. De ce fait, et aussi parce qu'elle utilise la phase de la fonction d'ambiguïté, cette méthode permet d'atteindre la résolution temporelle déterminée par la porteuse et pour les signaux continus. Le seuil d'une période de l'horloge d'échantillonnage est en effet très gênante pour la mesure de retards faibles.

ABSTRACT:

This paper describes the results of a wideband active sonar sea experiment done to test the bearing measurements precision in highlight points localization of a moving target. The method uses high time-frequency resolving signals and an antenna composed of at least 2 phase centers. The signals enable to exhibit highlight points by mean of crossambiguity between emission and each received sensor signal of the antenna. The bearing measurements are deduced from differential phase measurements made on the 2 crossambiguity functions. This original method eliminates temporal quantization due to signal sampling. The analysis of measurements shows that the bearing precision allowed by the effective bandwidth of the received signal and the signal to noise ratio is obtained, even when a propagation phase shift exists.

2. MOYENS UTILISES:

Le signal a été choisi le plus résolvant possible [1] non seulement en temps, mais aussi en temps-fréquence, pour séparer, autant que faire se peut, les différents échos provenant de réflecteurs ayant des vitesses radiales et des distances voisines, situés éventuellement dans des directions différentes. Les informations extraites d'images retard-Doppler sont alors spécifiques d'un seul point brillant. Le pouvoir séparateur ainsi obtenu dans le plan temps-fréquence peut éventuellement compenser une perte du pouvoir séparateur angulaire de l'antenne. Dans l'expérimentation présentée ici, le signal utilisé est un signal BPSK dont la fréquence porteuse, f_0 , est à 2500 Hz, qui possède une largeur de bande, B , de 625 Hz et une durée, T , de 2 s compatible avec la distance d'observation qui est voisine de 2000 m. La fréquence d'échantillonnage, f_e , est de 10 kHz. Le pouvoir séparateur en distance, $c/2B$, est de 1,2 m. Le pouvoir séparateur en vitesse radiale, $c/(2f_0T)$, est de 0,15 m/s. En ne prenant en compte que le lobe principal du signal émis, le calcul numérique de la bande efficace donne $B_e = 15\ 764$ Hz pour le signal avec porteuse et $B_c = 1\ 342$ Hz pour l'enveloppe complexe [3]. La résolution temporelle utile pour la localisation angulaire est donc $1/B_e$ ou $1/B_c$, selon que la propagation provoque ou pas un déphasage entre la porteuse et l'enveloppe complexe. L'enveloppe complexe du BPSK étant un signal binaire réel, il est aisé d'en calculer les copies Doppler.



L'antenne (fig. 1) est une antenne à 12 hydrophones omnidirectionnels, situés dans un plan vertical et espacés de $0,2\text{ m}$ ($\lambda/3$). Les 3 hydrophones de chaque demi-branche ont été regroupés pour former 4 "demi-voies": les 2 demi-voies "verticales", H et B, permettent la mesure du site et les 2 demi-voies "horizontales" G et D permettent de mesurer le gisement (fig. 2). Les centres de phase ainsi obtenus sont distants, 2 à 2, d'une longueur, l , égale à une longueur d'onde λ .

Le traitement réalisé (fig.2) est d'abord un traitement cohérent large bande qui crée une image temps-fréquence permettant d'accéder à une première caractérisation de la cible ou des cibles. Pour cela, nous effectuons d'abord une formation de voie large bande par sommation des signaux issus de chacun des 3 capteurs de chaque demi-branche avec une pondération 1-2-1 et un retard nul ou égal à ± 1 période d'échantillonnage. Après démodulation complexe de ces 4

l'inclinaison (si la cible est filiforme) et sur le rayon de courbure de la trajectoire (par l'importance du Doppler différentiel). Le nombre de points brillants localisables n'est pas limité par le nombre de capteurs, comme en passif. Le seuil de détection d'un point brillant dépend du rapport signal à bruit et de l'importance des pics secondaires de la fonction d'ambiguïté du signal émis.

La deuxième phase du traitement consiste à mesurer les différences de temps d'arrivée et de Doppler entre 2 images issues de 2 centres de phase verticaux ou horizontaux. Ceci permet de calculer la direction des points brillants de façon plus précise qu'avec une simple formation de voie portant sur l'ensemble des capteurs, à condition d'avoir préalablement bien identifié ces points sur les 2 images. Lorsque la distance entre centres de phase, l , est très petite devant la distance de chaque point brillant (fig. 4), il n'existe pas de Doppler différentiel significatif entre les 4 images d'un même point brillant. Pour extraire l'information différence de temps d'arrivée, il suffit de rechercher, sur la même coupe Doppler des 2 demi-voies verticales ou horizontales, la position des pics d'un même point brillant. Nous en déduisons immédiatement le site et le gisement du point brillant étudié.

Dans le cas d'écart de temps faibles, la quantification temporelle définie par la cadence d'échantillonnage provoque une imprécision importante pour cette mesure des différences de temps d'arrivée. Une façon d'y remédier consisterait à faire une très forte interpolation. Pour palier à cette difficulté, nous avons utilisé une alternative qui permet d'atteindre la résolution du cas continu sans augmentation du coût de calcul. Nous avons montré [2] qu'un faible écart de temps entre 2 signaux se traduit par un déphasage mesurable sur les phases des fonctions d'interambiguïté.

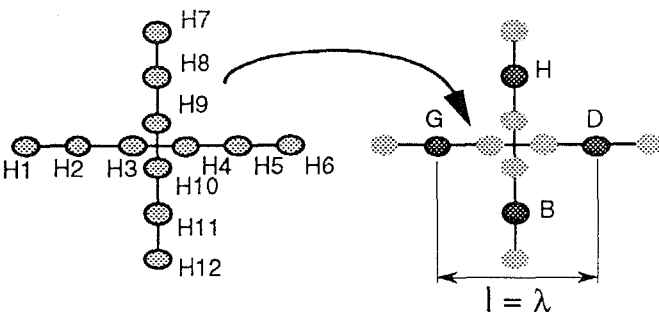


Fig. 1: Regroupement des capteurs en 4 demi-voies.

signaux et sous-échantillonnage dans un rapport 4, nous réalisons un filtrage adapté multi-Doppler. Les modules de ces fonctions d'interambiguïté émis-reçus nous donnent 4 images temps-fréquence très semblables (fig.3), dans lesquelles la position des pics d'un même point brillant diffère légèrement.

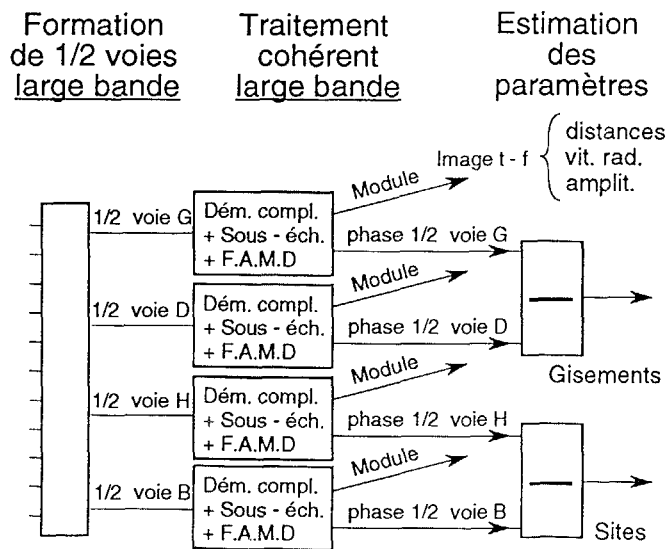


Fig. 2: Bloc-diagramme du traitement.

L'analyse d'une seule image permet la mesure des paramètres suivants: index de réflexion, distances, vitesses radiales de chaque point brillant. Elle renseigne aussi sur le milieu (écart de temps entre trajets multiples), sur les dimensions et

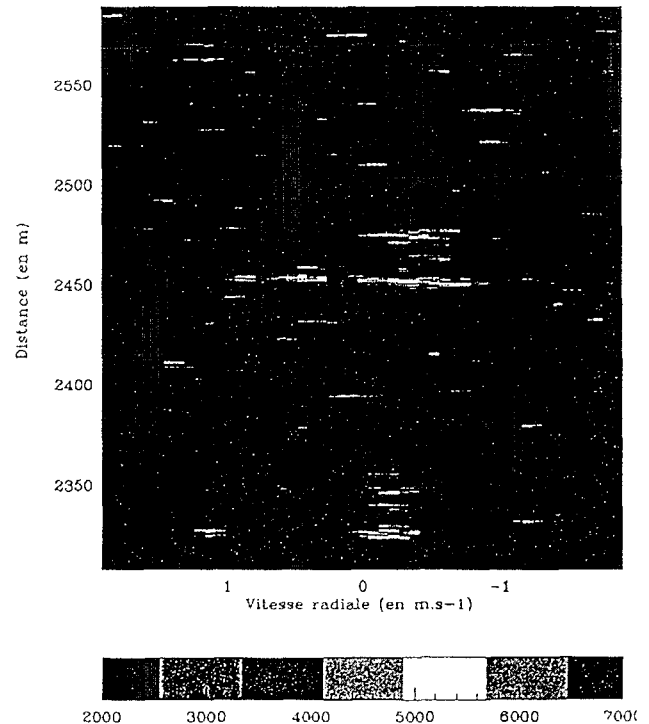


Fig. 3: Image distance-vitesse radiale issue de la demi-voie droite.

Lorsque les centres de phase sont séparés d'une distance l inférieure à $\lambda/2$, le retard est inférieur à $\pm 1/2f_0$ et le déphasage



vaut $5,4^\circ$ et l'écart angulaire maximum de $4,1^\circ$. L'écart type mesuré est de $1,6^\circ$.

Commentaire sur la qualité des mesures:

Ces valeurs sont à comparer à la largeur du lobe de directivité que nous aurions pu obtenir à l'aide de la même antenne en regroupant les 12 capteurs par formation de voie pointée dans la même direction. La longueur totale de l'antenne étant de $5\lambda/3$, la largeur du lobe à 3 dB, $2\theta_3 = \lambda/l$, est de l'ordre de 30° . Une première évaluation de la précision angulaire obtenue peut être faite en utilisant la borne de Cramer-Rao suivante, établie pour une antenne continue recevant une fréquence pure [4]:

$$\text{Var}_1(\hat{\theta}) \geq (\lambda/l)^2/R$$

où R est le rapport signal à bruit, évalué, dans notre expérimentation, à environ 32 (15 dB) après traitement.

Avec les valeurs indiquées, la formule précédente donne un écart type de 6°

Une autre évaluation de la précision angulaire peut être faite en comparant les performances obtenues avec celles qui se déduisent directement des performances en résolution temps des signaux utilisés et de la distance entre les centres de phase. Il a été montré que, même lorsque la propagation introduit un déphasage, la borne de Cramer-Rao, applicable à la mesure des différences de temps d'arrivée sur 2 capteurs proches, est donnée par la relation [7]:

$$\text{Var}_1(\hat{\tau}) = 2/(R \cdot B_e^2)$$

où B_e est très voisin de $2\pi f_0$. Avec une antenne à 2 centres de phase séparés par la distance D, la variance sur la mesure de la direction θ est donnée par la relation:

$$\text{Var}_2(\hat{\theta}) \geq 2(\lambda/D)^2/[R(4\pi^2 + (B_e/f_0)^2)]$$

En comparant la précision de localisation angulaire de l'antenne de longueur L, avec celle donnée par deux sous-réseaux de longueur L/2 et ayant des centres de phase distants de $D=L/2$, nous constatons que nous obtenons une variance 5 fois meilleure dans le deuxième cas. Ce gain en précision a, bien sûr, été obtenu au détriment du pouvoir séparateur.

Dans notre expérimentation, la bande efficace était de 15764 Hz, et le rapport signal à bruit R égal à 32 (15 dB). Ceci nous conduit à un écart type minimum de $2,3^\circ$. Les mesures faites nous donnent un écart type de $1,6^\circ$ sur le gisement pour une distance entre centre de phase égale à λ . Pour une mesure sans ambiguïté sur la direction (distance inter-capteurs = $\lambda/2$), l'écart type serait 2 fois plus fort et vaudrait $3,2^\circ$. Compte tenu de la difficulté de réaliser une bonne estimation du rapport signal à bruit nous pouvons conclure que la méthode utilisée permet d'atteindre les performances théoriques permises par les signaux.

4. CONCLUSION:

L'utilisation de la différence de phase des fonctions d'interambiguïté émis-reçus permet de s'affranchir de l'effet de quantification introduite par l'échantillonnage des signaux et d'atteindre les performances les meilleures (celles déterminées par la bande efficace du signal avec sa porteuse). Le schéma du

récepteur utilisé, contrairement aux schémas classiques proposés en radar [4], utilise l'information de phase disponible à la sortie du filtrage adapté multi-Doppler. Ceci est possible, car en sonar, les fréquences porteuses sont beaucoup plus basses et il est généralement plus facile de configurer l'antenne en plusieurs centres de phase. L'expérience réalisée montre qu'il est possible de privilégier la précision angulaire, au détriment du pouvoir séparateur, en configurant l'antenne en 2 sous-réseaux. Ceci nous semble particulièrement intéressant pour un sonar actif "classificateur". Nous avons pu vérifier qu'il est possible d'utiliser la phase du signal reçu sur une antenne très peu directive lorsque la distance entre centres de phase n'est que de quelques longueurs d'onde. Nous pouvons enfin souligner que la méthode proposée permet de réduire le nombre de voies à réaliser sans perdre en précision de localisation.

Des résultats plus complets concernant les performances de cette méthode active spatiale large bande sont à venir.

Ce travail a été réalisé avec le soutien de la Direction des Constructions Navales dans le cadre d'une convention DCN/CEPHAG.

5. REFERENCES:

- [1]- G. JOURDAIN- J.P. HENRIOUX: Use of large bandwidth-duration binary phase shift keying signals in target delay Doppler measurements. JASA July 1991
- [2]- J.P. HENRIOUX- G. JOURDAIN: Use of large bandwidth-duration BPSK signals for active sonar classification and bearing measurements. Paraîtra dans JASA en oct. 1993.
- [3]- M.A. PALLAS: Identification active d'un canal de propagation à trajets multiples: Thèse de Docteur de l'INPG 28/02/88.
- [4]- F. LE CHEVALIER: Principes de traitement des signaux radar et sonar, MASSON, 1989.
- [5]- RIHACZEK: Principles of high-resolution radar, MacGraw Hill, 1969.
- [6]- E. COLLET, J.P. HENRIOUX: Estimation de paramètres en sonar actif: Localisation et identification de cibles. DEA 91/92, Rapport CEPHAG n° 31/92.
- [7]- E. LECOQ, J.P. HENRIOUX, G. LOUBET: CONCEPTION DU SIGNAL EN SONAR ACTIF: Etude de l'influence de la résolution conjointe en temps et en fréquence des signaux à large bande utilisés en sonar actif sur les mesures de localisation spatiale et de vitesse radiale. DEA 92/93, Rapport CEPHAG n° 20/93.