

Estimation de la vitesse d'une cible en mouvement par une méthode large bande

Alexis MOURS¹, Jérôme I. MARS¹, Cornel IOANA¹, Nicolas F. JOSSO², Yves DOISY², Philippe ROUX³,

¹Université Grenoble Alpes, GIPSA-lab,
11 rue des Mathématiques, Grenoble Campus, BP46, F - 38402 Saint Martin d'Hères Cedex, France

²Thales Underwater Systems,
525 route des Dolines, 06560 Valbonne Sophia Antipolis, France

³Université Grenoble Alpes, ISTERre,
ISTERre BP 53, 38041 Grenoble CEDEX 9, France

Alexis.Mours@gipsa-lab.fr, Jerome.Mars@gipsa-lab.fr, Cornel.Ioana@gipsa-lab.fr
Nicolas.Josso@fr.thalesgroup.com, Yves.Doisy@fr.thalesgroup.com
Philippe.Roux@ujf-grenoble.fr

Résumé – La connaissance de la réponse impulsionnelle d'un canal de propagation est nécessaire pour un grand nombre d'applications dans le domaine de l'acoustique sous-marine comme la communication, la localisation et détection sonar, la surveillance des mammifères marins... Cette réponse impulsionnelle nous informe sur les distorsions dues au canal, que subit un signal, et sur les déformations (décalage doppler non maîtrisé) engendrées par le mouvement relatif entre source et récepteur. Dans ce contexte, la connaissance du signal transmis permet d'estimer la vitesse apparente de chaque trajet de propagation à l'aide du plan d'ambiguïté large bande [1][2][3]. On sait qu'un filtrage basé sur les opérateurs de déformation temporelle et de plan d'ambiguïté large bande permet de séparer chaque trajet de façon précise afin de supprimer les interférences et d'estimer correctement la réponse impulsionnelle - avec le retard et le facteur de compression [4]. Dans cette étude, il est proposé une approche complémentaire pour estimer conjointement la vitesse et la distance d'une cible à faible vitesse (faible doppler) avec de bonnes résolutions. Les formes d'ondes émises sont des signaux codés tels que les signaux de Costas, les Binary Phase Shift Keying (BPSK) et les trains d'impulsions modulés linéairement en fréquence (Pulse Train Frequency Modulation, PTFM), dans un contexte large bande. Ces formes d'ondes étant larges bandes et ayant un fort produit BT, permettent ainsi d'utiliser un modèle d'écho prenant en compte la compression temporelle du signal dû à l'effet Doppler.

Abstract – The knowledge of the impulse response of the propagation channel is required for many underwater applications such communication, sonar localization and detection, and marine mammals monitoring. This impulse response affects the signal and informs about the canal distortions, but also modifications (uncontrolled Doppler effects) caused by the relative motion between source and receiver. Knowing the emitted signal, the radial speed of each acoustic path can be estimated with the wideband ambiguity plan [1][2][3]. With warping operators based-filter and wideband ambiguity plan [4], acoustic paths can be accurately separated in order to remove interferences and estimate properly the impulse response - with the delay and the Doppler compression coefficient. This paper presents a complementary approach to jointly estimate the target distance and speed at low speed (low Doppler) with reasonable resolution. The emitted waveforms are 22-Welch-Costas signal, Binary Phase Shift Keying (BPSK) signal, and Pulse Train Frequency Modulation (PTFM) signal. Signals with a large time-bandwidth product (high TB) allow use of an echo model that accounts for a signal temporal compression (Doppler effect).

1 Introduction

Les systèmes sonars actifs sont classiquement utilisés pour estimer conjointement la position et la vitesse d'une cible en mouvement. La configuration des différents trajets multiples entre source, cible et récepteurs, ajoute à la complexité des ondes diffusées. N.Josso *et al* ont montré dans un contexte de tomographie active que des retards et des Dopplers peuvent être estimés par l'utilisation du plan d'ambiguïté large bande pour corriger le mouvement de la source [5]. Cet article étudie conjointement la position et la vitesse d'une cible en mouve-

ment avec différents types de sources et dans un contexte large bande. Les trajets acoustiques peuvent être déterminés en utilisant la formation de voie conventionnelle. Le retard et le Doppler de chaque trajet acoustique peuvent alors être estimés en calculant le plan d'ambiguïté large bande [1][2][3]. Dans un premier temps le modèle Doppler large bande et la fonction d'ambiguïté sont présentés. Puis une seconde partie explique le protocole de la plateforme expérimentale, ainsi que les signaux émis. Enfin les résultats des trois formes d'ondes sont comparés au regard de la théorie.

2 Modélisation doppler large bande

Soit $s(t)$ le signal complexe (analytique) large bande transmis sous la forme d'une modulation par une fréquence porteuse f_p ,

$$s(t) = \mu(t)e^{2i\pi f_p t} \quad (1)$$

où $\mu(t)$ est l'enveloppe complexe. Supposons que le signal réel émis est réfléchi par une cible ponctuelle en mouvement, alors le signal reçu par un capteur pour un trajet acoustique est décalé en temps et modifié par l'effet Doppler,

$$x(t) = \sqrt{\eta_0} s(\eta_0(t - \tau_0)) \quad (2)$$

où τ_0 et η_0 sont le retard et le coefficient de compression Doppler de la cible. Le facteur $\sqrt{\eta_0}$ permet de conserver l'énergie du signal. Dans le cas général, le facteur de compression Doppler est donné par [1],

$$\eta_0 = (1 + \frac{v_0}{c}) / (1 - \frac{v_0}{c}) \quad (3)$$

où v_0 est la vitesse radiale relative de la cible, mais peut être simplifiée, en vérifiant l'hypothèse que $\frac{v_0}{c} \ll 1$, par

$$\eta \simeq 1 + 2\frac{v_0}{c} \quad (4)$$

L'effet Doppler comprime ou dilate le signal temporel. Lorsque le signal vérifie la condition d'un signal large bande avec un fort produit BT ($TB^2/f_p \gg 1$) alors le modèle du signal reçu doit prendre en compte la modification de l'échelle temporelle [2] et pas uniquement un décalage fréquentiel.

3 Plan d'ambiguïté large bande

Le retard τ_0 et le coefficient de compression Doppler η_0 de la cible par rapport au récepteur peuvent donc être calculés en corrélant le signal reçu $x(t)$ avec des signaux de référence $r_\eta^\dagger(t)$ qui sont des versions compressées ou dilatées du signal transmis. Pour chaque combinaison de retard et de coefficient Doppler, une corrélation $\phi(\tau, \eta)$ est calculée entre le signal reçu et un signal de référence.

$$\phi(\tau, \eta) = \int_{-\infty}^{+\infty} r_\eta^\dagger(t - \tau)x(t) dt \quad (5)$$

où \dagger représente le conjugué complexe. Cette corrélation peut être réécrite comme [4],

$$\phi(\tau, \eta) = \sqrt{\eta\eta_0} \int_{-\infty}^{+\infty} s[\eta(t)]s[\eta_0(t - \tau_0 + \tau)] dt \quad (6)$$

L'estimation des paramètres de la cible ($\hat{\tau}_0, \hat{\eta}_0$) au sens du maximum de vraisemblance (MV), sous l'hypothèse d'un bruit blanc, gaussien et additif, s'écrit,

$$(\hat{\tau}_0, \hat{\eta}_0) = \arg \max_{(\tau, \eta)} \left\{ |\phi(\tau, \eta)|^2 \right\} \quad (7)$$

($\hat{\tau}_0, \hat{\eta}_0$) sont les paramètres qui maximisent le plan d'ambiguïté large bande défini par [3] comme,

$$\chi(\tau, \eta) = |\phi(\tau, \eta)|^2 / E \quad (8)$$

où E est l'énergie du signal émis.

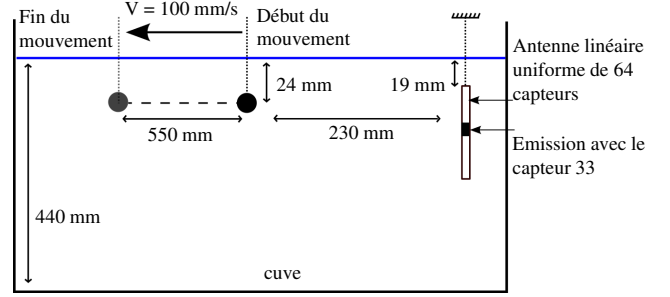


FIGURE 1 – Configuration de la cuve d'eau expérimentale. L'expérience est composée d'une antenne (ULA) de 64 capteurs placés verticalement et d'une cible sphérique métallique en mouvement. Une forme d'onde est émise par le transducteur 33 lorsque la cible a atteint sa vitesse constante $V = 0.1 m.s^{-1}$.

4 Plateforme expérimentale

Le plan d'ambiguïté large bande développé avec le modèle d'écho doppler large bande permet l'estimation conjointe des temps d'arrivées et des dopplers de chaque trajet acoustique. Afin de vérifier ces estimations dans un cas réel avec une vitesse de cible très faible, un scénario de sonar actif en mer profonde est reproduit à échelle réduite dans la cuve expérimentale du laboratoire IsTerre [6], de dimension $1.9 m \times 0.9 m \times 0.6 m$. Une échelle de 200 :1 est prise pour reproduire une source active de fréquence centrale $5 kHz$ dans une mer profonde avec une cible sphérique de diamètre $0.7 m$, de profondeur $4.8 m$ à une vitesse horizontale de $0.1 m.s^{-1}$ et une antenne verticale linéaire uniforme de 64 capteurs à une profondeur déarrant à $3.8 m$. L'antenne et la cible seraient approximativement distantes de $112 m$ lors de la réflexion de l'onde. Dans la cuve, l'antenne a une fréquence centrale de $1 MHz$ avec une bande de $1 MHz$ et le système d'acquisition échantillonne à $F_e = 20 MHz$. A l'émission, seul le capteur 33 est utilisé. La cible est un plomb sphérique de diamètre $3.5 mm$ relié à un bras motorisé par un fil de pêche très fin. La figure 1 montre le schéma de l'expérience à échelle réduite. La cible et l'antenne sont distantes de $230 mm$ à l'instant t_0 et sont suffisamment proches de la surface pour considérer que le trajet réfléchi par le fond n'est pas présent. Puis la cible est mise en mouvement sur une distance de $55 cm$ par le bras motorisé pour atteindre une vitesse horizontale constante de $100 mm.s^{-1}$.

4.1 Signaux émis

Les sources étudiées ont une durée de $500 \mu s$ et une bande de $600 kHz$ autour de $1 MHz$. Ils ont un produit B-T fort égal à 300 et respectent la condition large bande citée précédemment. Le plan d'ambiguïté large bande est utilisé sur les signaux synthétiques émis pour calculer leur résolution à $-3 dB$ en temps et en vitesse. Les résolutions sont calculées en prenant les coordonnées du grand axe de l'ellipse formée par le contour à $-3 dB$ du plan retard-vitesse normalisé. Le tableau 1 résume ces

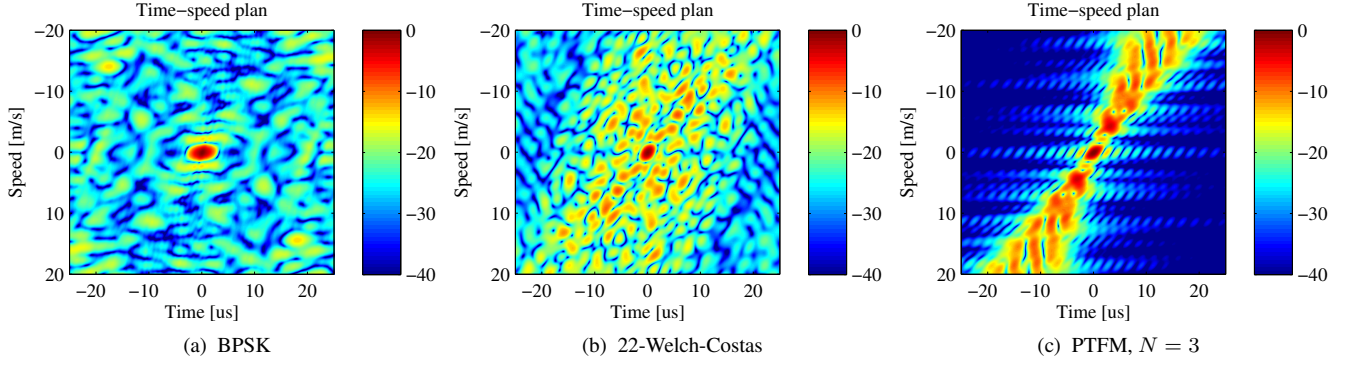


FIGURE 2 – Fonctions d’ambiguïté large bande du signal BPSK (2a), 22-Welch-Costas (2b), et du PTFM ($N = 3$) (2c). $T = 500 \mu s$ et $B = 600 kHz$

résolutions pour les trois formes d’ondes émises.

4.1.1 Signal BPSK

Soit $s(t)$ un signal complexe modulé en phase,

$$s(t) = e^{i\pi c(t)} e^{2i\pi f_p t} \quad (9)$$

où $c(t)$ est une séquence aléatoire binaire constituée de N symboles, dont la durée θ est fixée par la bande spectrale désirée, $\theta = 2/B$.

4.1.2 Signal de Welch-Costas

Les signaux de Costas sont des trains d’impulsions à saut de fréquence. La forme d’onde est divisée en N impulsions de durée égale. Chaque impulsion ne peut prendre qu’une seule valeur de fréquence parmi celles disponibles. Chaque fréquence est donc propre à chaque impulsion. Les fréquences sont déterminées par une séquence de Costas qui est générée par la méthode de Welch-Costas [7][8]. Pour le nombre premier $p = 23$ et la racine primitive 5, le code de Costas de longueur $N = p - 1$ généré par la méthode de Welch est décrit par $\theta_n = \{5, 2, 10, 4, 20, 8, 17, 16, 11, 9, 22, 18, 21, 13, 19, 3, 15, 6, 7, 12, 14, 1\}$. Les fréquences des impulsions sont données par la formule,

$$f_n = (f_p - \frac{B}{2}) + (\theta_n - 1) \frac{B}{N - 1} \quad \text{for } 0 \leq n \leq N - 1 \quad (10)$$

Le signal complexe du train d’impulsions est donnée par,

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} p_n(t - nT_s) \quad (11)$$

où $p_n(t) = \begin{cases} e^{2i\pi f_n t} & \text{pour } 0 \leq t \leq T_s \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$ est une impulsion de durée T_s égale à T/N .

4.1.3 Train d’impulsions de modulation linéaire de fréquence (PTFM)

PTFM est un train d’impulsions de MLF. La forme d’onde est divisée en N impulsions de durée égale à T_s . Le signal complexe du train d’impulsions est donné par l’équation 11,

$$p_n(t) = \begin{cases} e^{2i\pi(f_p + \frac{B}{2T}t)t} & \text{pour } 0 \leq t \leq T_s \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (12)$$

et $T_s = \frac{T}{N}$ la durée de l’impulsion. Sur les figures 2a, 2b et 2c, on observe les plans d’ambiguïté large bande du BPSK, du 22-Welch-Costas et du PTFM respectivement. Ces plans montrent tous un lobe principal centré en $(0,0)$, et des lobes secondaires plus forts pour le 22-Welch-Costas et plus localisés pour le PTFM. Le plan retard-vitesse du PTFM possède aussi une répétition du motif de la figure 2c aux multiples $\pm T_s$ et $\pm 2T_s$ avec une amplitude décroissante. Le tableau 1 montre les résolutions à $-3 dB$ en temps et en vitesse dans le plan retard-vitesse des trois formes d’ondes considérées. Les trois formes

TABLE 1 – Résolution à $-3 dB$ en temps (ou distance) et en vitesse pour les formes d’ondes : BPSK, PTFM et Costas.

	Résolution en temps [μs] ou en distance [mm]	V_{-3dB} . Résolution en vitesse [$m.s^{-1}$]
BPSK	1.03 μs / 1.53 mm	0.69 $m.s^{-1}$
22-Welch-Costas	0.93 μs / 1.39 mm	0.69 $m.s^{-1}$
PTFM	0.78 μs / 1.16 mm	0.75 $m.s^{-1}$

d’ondes sont dans le même ordre de grandeur au niveau des résolutions, mais le BPSK et le 22-Welch-Costas seront moins sensibles aux interférences par rapport au PTFM, car l’énergie des lobes secondaires est plus étalée dans le plan retard-vitesse. Par contre il faut faire attention à ce que la différence de temps d’arrivée entre deux échos successifs du même trajet acoustique soit plus grande que la résolution temporelle, sinon ils ne seront pas séparables.

5 Résultats en cuve

Chaque forme d’onde est émise à un instant fixe $t = 4.5 s$ après le départ de la bille afin que l’onde soit réfléchi lorsque la bille est à vitesse constante. Pour chaque forme d’onde, les deux trajets acoustiques sont détectés en élévation et sont analysés : trajet direct et trajet réfléchi surface. Les plans retard-vitesse sont donc calculés après formation de voie et leur pavage est de $\Delta\tau = 1/Fe$ et $\Delta V = V_{-3dB}/70$. Sur la figure 3, on observe les plans retard-vitesse pour les trois formes

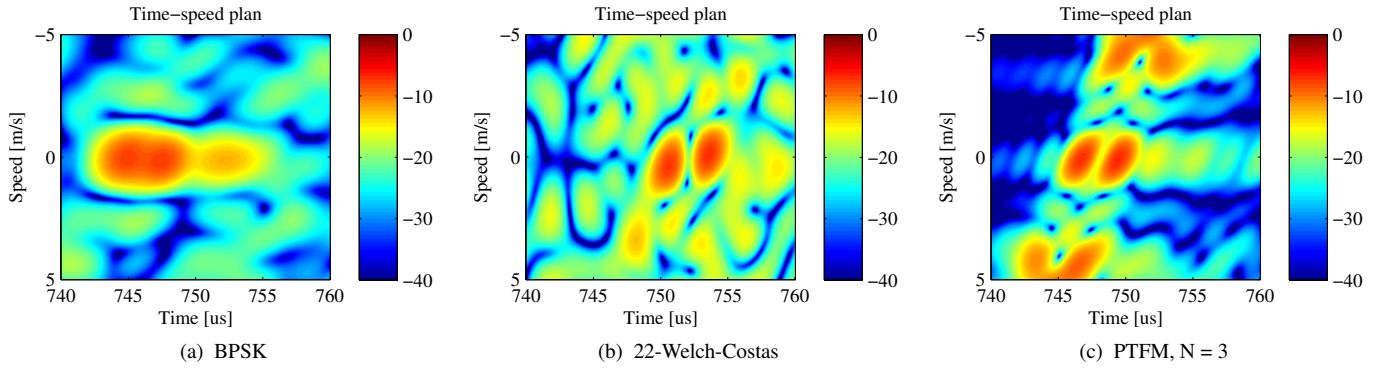


FIGURE 3 – Plan d’ambiguïté large bande, pour le trajet direct (Angle d’élévation = 5°), du signal BPSK (3a), 22-Welch-Costas (3b), et du PTFM ($N = 3$) (3c). $T = 500 \mu s$ et $B = 600 kHz$.

d’ondes et pour le trajet direct. On observe sur les figures 3b et 3c deux échos espacés de $2.7 \mu s$. Le premier écho est une réflexion directe de l’onde par la bille. Alors que le deuxième écho est un signal parasite, et qui provient probablement d’une onde élastique traversant la bille. Les formes d’ondes émises ont donc bien la résolution temporelle nécessaire à la résolution de deux échos très proches sauf dans le cas du BPSK (cf. figure 3). Les plans retard-vitesse du PTFM et du 22-Welch-Costas sont cohérents avec le paragraphe précédent si on suppose qu’il y a deux échos. L’estimation de la vitesse radiale de la cible pour les deux trajets et les deux échos est donnée dans le tableau 2 pour chaque forme d’onde étudiée. Malgré

TABLE 2 – Vitesse radiale en [$m.s^{-1}$] estimée pour le trajet direct (Angle d’élévation = 5°) et le trajet réfléchi surface (Angle d’élévation = 10.3°) pour les trois formes d’ondes. Dans la première colonne sont présentés les résultats pour le premier écho, et dans la seconde les résultats pour le second écho.

Trajet	1 ^{er} écho à $t \sim 748 \mu s$		2 ^e écho à $t \sim 751 \mu s$	
	Direct	Surface	Direct	Surface
BPSK	0.15	0.09	0.13	0.09
PTFM	0.08	0.08	0.12	0.11
22-Welch-Costas	0.35	0.29	-0.11	-0.19

des échos non résolus dans le plan retard vitesse du BPSK, les vitesses estimées restent cohérentes et proches de la vitesse attendue ($V_{reelle} = 0.1 m.s^{-1}$). Les vitesses estimées par le plan retard-vitesse du signal PTFM sont plus proches de la vitesse réelle. Mais dans un contexte bruité, les lobes secondaires diminueraient probablement la précision de mesure. Pour le plan retard-vitesse du signal 22-Welch-Costas, les vitesses estimées ne sont pas exactes mais restent cohérentes avec la résolution $\pm 0.7 m.s^{-1}$.

6 Conclusion et travaux futurs

Ce papier montre expérimentalement qu’il est possible d’estimer une vitesse faible d’une cible en mouvement à partir d’un seul tir de forme d’onde large bande et avec un fort produit B-T. Les trois formes d’ondes sont comparées et présentent des performances assez proches. Le plan d’ambiguïté large bande associé à des signaux large bande permet ainsi une résolution temporelle et doppler beaucoup plus fine que dans le cas de signaux bande-étroite ou lorsque la fonction d’ambiguïté classique de Woodward est utilisée. Les travaux à venir consistent à étudier les échos de cibles plus complexes (maquette sous-marin, poissons) puis à estimer l’immersion et le vecteur vitesse de la cible à des fins de classification.

Références

- [1] Z.-B. Lin, “Wideband ambiguity function of broadband signals,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 83, no. 6, pp. 2108–2116, 1988.
- [2] A. W. Rihaczek, “Delay-doppler ambiguity function for wideband signals,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. AES-3, no. 4, pp. 705–711, Jul. 1967.
- [3] J.-P. Hermand and W. I. Roderick, “Delay-Doppler resolution performance of large time-bandwidth-product linear FM signals in a multipath ocean environment,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 84, no. 5, pp. 1709–1727, Nov. 1988.
- [4] N. F. Josso, C. Ioana, J. I. Mars, C. Gervaise, and Y. Stéphan, “On the consideration of motion effects in the computation of impulse response for underwater acoustics inversion,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 126, no. 4, p. 1739, 2009.
- [5] N. F. Josso, C. Ioana, J. I. Mars, and C. Gervaise, “Source motion detection, estimation, and compensation for underwater acoustics inversion by wideband ambiguity lag-doppler filtering,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 128, no. 6, 2010.
- [6] P. Roux, I. Iturbe, B. Nicolas, J. Virieux, and J. I. Mars, “Travel-time tomography in shallow water : Experimental demonstration at an ultrasonic scale,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 130, no. 3, pp. 1232–1241, 2011.
- [7] S. Pecknold, W. Renaud, D. McGaughey, J. Theriault, and R. Marsden, “Improved Active Sonar Performance Using Costas Waveforms,” *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 34, no. 4, pp. 559–574, Oct. 2009.
- [8] S. Maric, I. Seskar, and E. Titlebaum, “On cross-ambiguity properties of Welch-Costas arrays,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 30, no. 4, pp. 1063–1071, Oct. 1994.