

Mesure de la vitesse par rapport au fond avec un Sondeur Multi-Faisceaux

Laurent VERRIER

ECA Group

Gipsa-lab, LIS

Toulon and Grenoble, France

verrier.l@ecagroup.com

Marc A. PINTO

Technical Directorate

ECA Group

Toulon, France

pinto.m@ecagroup.com

Cornel IOANA

Gipsa-lab

Université Grenoble - Alpes

Grenoble, France

cornel.ioana@grenoble-inp.fr

Nadège THIRION-MOREAU

UTLN, AMU, CNRS, LIS, Seatech,

UMR 7020, SIIM Team

Toulon, France

thirion@univ-tln.fr

Abstract—To reduce the bias, or scale factor error, of a Doppler Velocity Log (DVL) is important since this error limits the long term navigation accuracy of most surface and underwater vehicles. In this article, we show that a 150kHz Multi-Beam Echo Sounder (MBES) can be used as a DVL, allowing to increase the range beyond 300m. The underlying theory was presented in [1]. The array processing can be used to mesure Doppler phases in many directions at the same time.

The suggested method has been tested on the SeapiX, a MBES operated at 150kHz, during a sea trial in the bay of La Ciotat. The boat, equipped with a GNSS-aided inertial measurement unit (IMU), made straight lines at a constant speed (of $2m.s^{-1}$). The MBES was transmitting a specific Doppler sensitive waveform according to different directivity scenarios. After the processing of the sonar data, we were able to estimate a velocity wich closely matches data of IMU. Analysis of the navigations errors using IMU as ground truth is presented to quantify the accuracy of the method.

Index Terms—array processing, micro-navigation underwater acoustics, Doppler Velocity Log, Multi-Beam Echo Sounder

I. INTRODUCTION

Parmi l'ensemble des sondeurs qui peuvent équiper un véhicule marin, le DVL (Doppler Velocity Log) est celui qui mesure la vitesse de déplacement par rapport au fond de la mer. Les ondes radios ne se propagent pas dans le milieu aquatique ce qui rend les GPS inutilisables. Le DVL, en utilisant des ondes acoustiques, est donc indispensable pour la navigation sous-marine. En effet, la position géographique du véhicule au cours du temps se déduit à partir de la vitesse.

Cependant, le DVL mesure la vitesse dans le référentiel de l'instrument. Remonter à la vitesse dans un référentiel terrestre nécessite l'utilisation d'une centrale inertielle. La centrale inertielle mesure les accélérations et la vitesse de rotation du véhicule. Isolée des autres capteurs, elle serait donc capable de mesurer le positionnement de l'appareil par double intégration des accélérations orientées mesurées, à partir d'un point de départ. Mais au fil du temps, les erreurs s'accumulent jusqu'à la dérive totale. Le DVL intervient alors pour recalibrer la centrale inertielle. Le filtre de navigation qui est un filtre de Kalman, fusionne les mesures du DVL avec celles de la centrale inertielle pour obtenir la position géographique du

véhicule la moins erronée possible. La centrale inertielle a un fort biais que le filtre de navigation compense par le faible biais du DVL. Mais le DVL a une forte variance que le filtre compense du fait de la faible variance de la centrale inertielle. D'autres instruments comme le capteur de pression, le GPS (si on est hors de l'eau)... peuvent être intégrés au filtre de navigation pour limiter la dérive de la centrale inertielle pour améliorer ainsi le positionnement du véhicule sous-marin. Par conséquent, le biais du DVL est un facteur crucial pour une bonne navigation sous-marine [2] [3].

Pour mesurer la vitesse, le DVL tire deux impulsions acoustiques identiques [4], vers le fond, espacées temporellement d'un instant choisi et connu : l'inter-pulse. Les ondes se propagent dans l'eau, se réfléchissent sur le fond, et reviennent à l'émetteur en déplacement. A la réception, le retard du deuxième écho par rapport au premier est comparé à l'inter-pulse. L'allongement temporel entre les deux échos signifie que l'appareil s'est éloigné du fond. Dans le cas inverse, la diminution temporelle témoigne d'un rapprochement du fond. Ce retard (ou cette avance) temporel, donne la vitesse de déplacement dans l'axe de tir. Pour mesurer cet écart temporel entre les deux échos, on utilise l'auto-corrélation du signal reçu. On observera un pic au voisinage de l'inter-pulse, résultant de la superposition du premier écho sur le deuxième. La phase à ce maximum est la phase Doppler qui donne le retard du deuxième écho par rapport au premier.

Le DVL a un biais qui provient d'une mauvaise relation entre le déphasage Doppler et l'axe de mesure. L'émission concentre l'énergie dans un faible intervalle angulaire centré sur la direction de tir : l'axe du faisceau. A la réception, à cause des différentes trajectoires, l'énergie ne se répartie pas symétriquement autour de l'axe. La phase Doppler moyenne est donc biaisée puisqu'elle ne se fait plus sur le bon axe [5]. Pour réduire ce biais, la stratégie consiste à affiner le faisceau à l'émission pour avoir une dissymétrie moins marquée à la réception. Pour cela, les DVL actuels augmentent la fréquence des signaux émis ce qui dégrade leur portée.

Dans [1], une méthode théorique est proposée pour réduire le biais autrement qu'en diminuant la fréquence d'émission, à l'aide de sondeurs multi-faisceaux et de traitement interférométriques. Les traitements d'antennes permettent de réduire l'empreinte effective du faisceau et d'avoir une

meilleure connaissance de la direction d'arrivée pour limiter le biais, tandis que leurs fréquences d'utilisation plus basses augmentent leur portée. Un biais plus faible et une portée plus grande permettent un positionnement toute profondeur plus précis pour une navigation sous-marine autonome de plus longue durée et à des profondeurs plus grandes.

L'expérimentation suivante a pour but de valider l'utilisation d'un SMF pour mesurer la vitesse. Nous détaillerons comment l'instrument a été converti en DVL. D'abord nous présenterons le matériel utilisé. Ensuite, nous décrivons la mission. Puis nous développerons le traitement des données pour obtenir l'équivalent d'un DVL classique suivi des résultats obtenus sur les données réelles issues de l'expérimentation en mer.

II. DESCRIPTION DE L'EXPÉRIMENTATION EN MER

Cette expérimentation en mer a requis l'utilisation d'une centrale inertielle ROVINS et d'un SMF SeapiX fixés sur une perche (fig. 1), et d'un RTK-GNSS, le tout sur un bateau GG9 de la division Survey d'iXblue.



Fig. 1. Photos du SeapiX et de la ROVINS fixés avant l'expérimentation

Le SeapiX [6] est un sonar multi-faisceaux fabriqué par la société iXblue. Le réseau est agencé en croix de Mills, chaque bras est une antenne linéaire de 64 capteurs espacés de $d = 5,5mm$. Il présente l'avantage suivant : chaque bras peut émettre et recevoir.

Le bateau navigue presque en ligne droite, dans la baie de La Ciotat, à la vitesse de $v = 2m.s^{-1}$ en suivant l'isobath $h = 15m$ de profondeur.

Le code émission employé se compose de deux impulsions CW (Continuous Wave) à $f_0 = 150kHz$ espacées de $\Delta t = 1ms$ (inter-pulse) avec une largeur de bande de $B = 10kHz$.

On définit un ping comme l'émission des deux impulsions et la réception du double écho. On définit une séquence comme la paire de ping suivante : le premier ping généré par l'antenne linéaire le long de l'axe du navire (L comme longitudinale) est reçu par l'antenne linéaire perpendiculaire (T comme transverse), le deuxième ping émis par l'antenne T à la suite de la réception du premier ping est reçu par l'antenne L (voir fig. 2). Cette alternance permet de balayer l'ensemble des directions.

III. TRAITEMENT DES DONNÉES DE NAVIGATION

Le RTK-GNNS aidé de la centrale inertielle Rovins donne la vitesse dans le repère NED et l'attitude à 5Hz. La vitesse calculée avec le SeapiX sera dans le repère du SeapiX. Pour effectuer la comparaison, Il faut donc ramener la vérité terrain dans le repère du SeapiX à l'aide des angles d'attitudes donnée par la centrale : l'angle de gîte, d'assiette et de cap [8].

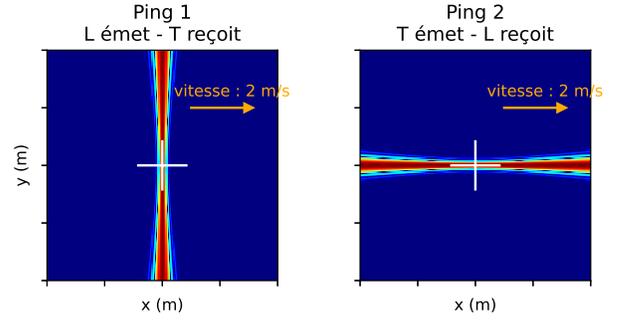


Fig. 2. Directivité du SeapiX sur le fond en fonction du bras d'antenne émetteur (En rouge les zones les plus éclairées)

IV. TRAITEMENT DES DONNÉES DU SEAPIX

Pour chaque ping, nous disposons des 64 enregistrements des 64 capteurs du bras récepteur. Chaque ping dure environ 80ms. Le double écho du fond est reçu entre 20 et 40ms.

A. Formation de voies

Pour exploiter l'effet Doppler pour mesurer la vitesse, il faut sélectionner une partie de l'écho du fond. La formation de voie (FV) agit comme directivité à la réception. En effet, la formation de voie réduit l'antenne à un capteur unique directif. Elle résulte de la somme des signaux de tous les capteurs, déphasés dans le but d'amplifier l'énergie dans une direction et de réduire l'énergie dans les autres. L'intersection de la directivité émission avec la directivité réception (la FV) sur le fond donne une empreinte effective fine. (fig 3)

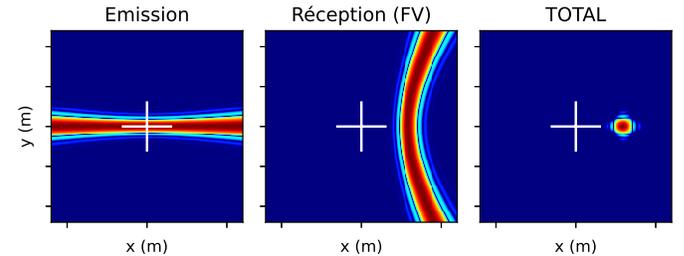


Fig. 3. Directivité du SeapiX sur le fond à l'émission à gauche, Formation de voie à la réception au centre, et somme émission-réception à droite. (En rouge les zones les plus éclairées)

Pour N capteurs, l'expression de la TF (transformée de Fourier) \hat{S} de la voie pointant d'un angle d'incidence θ en champ proche pour toute fréquence f est :

$$\hat{S}(f, \theta) = \sum_n^N W_n \hat{s}_n(f) e^{2i\pi \frac{f}{c} \left(x_n \sin \theta - \frac{x_n^2 \cos^3 \theta}{2h} \right)} \quad (1)$$

avec W_n une fenêtre de Hanning sur N points, \hat{s}_n et x_n respectivement la TF et les coordonnées du capteur n , h la hauteur, et $c = 1515m.s^{-1}$ la célérité du son mesurée à l'aide d'un capteur pendant l'expérimentation.

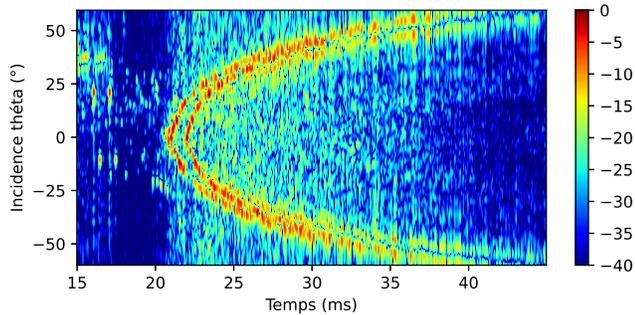


Fig. 4. Signaux temporels en fonction de l'angle d'observation d'incidence. L'amplitude est en décibel.

La figure 4 montre les formations de voies pour les directions comprises entre -60° et 60° en fonction du temps. Le double écho du fond est mis en évidence pour chaque voie de réception. La forme hyperbolique du tracé énergétique vient du fait que le premier écho du fond est celui qui a le trajet le plus court, arrive de l'incidence 0° . Plus l'incidence augmente, plus le temps de parcours est long, plus les échos arrivent tard.

B. Autocorrélation et estimation de la phase Doppler

On réalise l'auto-corrélation de chaque voie :

$$AC(t, \theta) = \int_F \hat{S}(f, \theta) \overline{\hat{S}(f, \theta)} e^{2i\pi ft} df \quad (2)$$

où $\overline{\hat{S}(f, \theta)}$ représente le conjugué complexe de $\hat{S}(f, \theta)$

Sur la figure 5, on observe bien le pic d'intercorrélation entre le premier écho et le deuxième à $t = 1ms$, le temps d'inter-pulse. La phase au pic est la phase Doppler, qui donne précisément le décalage temporel en phase entre le temps de réception du premier écho, et celui du deuxième. Il est à comparer avec l'écart d'origine (l'inter-pulse), pour analyser le déplacement.

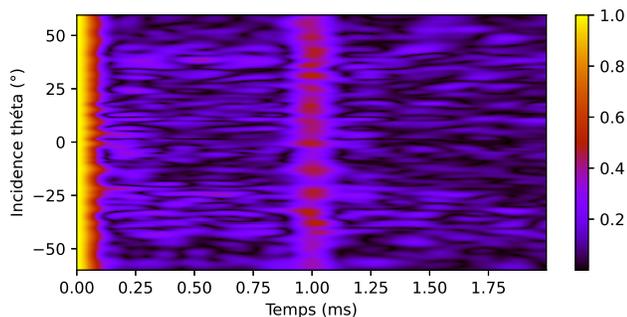


Fig. 5. Autocorrélation voie par voie. La couleur indique l'amplitude normalisée voie par voie.

Pour chaque séquence, on extrait les phases Doppler de toutes les voies. Il est intéressant de remarquer sur la figure 6 que les phases Doppler sur l'antenne réceptrice transverse sont presque constantes et nulles pour toutes les voies. En effet, le

véhicule se déplace le long de l'axe x , perpendiculairement à l'antenne T . En revanche, les phases Doppler sur l'antenne réceptrice longitudinale évoluent en fonction de la direction d'observation. Les phases sur le devant sont positives puisque le véhicule va vers l'avant, il se rapproche du fond. Les phases sur l'arrière sont négatives, puisque le véhicule avance, et s'éloigne donc du fond.

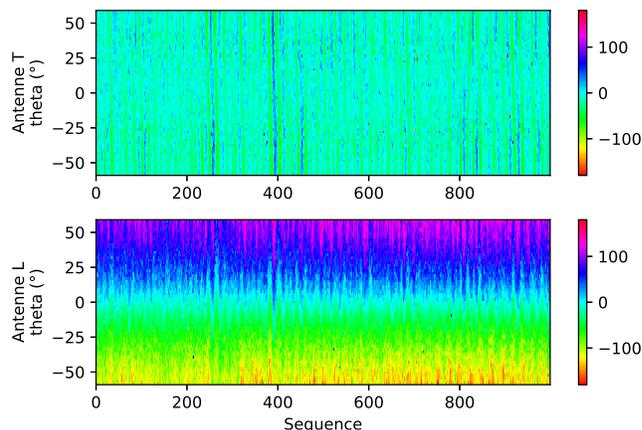


Fig. 6. Phases Doppler à chaque séquence pour chaque voie, en haut, de l'antenne T , en bas, de l'antenne L . La couleur est représentative de la valeur de la phase Doppler donnée en degré.

Le tangage et le roulis provoqués par la houle expliquent les variations périodiques de la phase Doppler en fonction du temps. A profondeur égale, à vitesse constante, et à angle d'observation donnée, on devrait obtenir des phases Doppler constantes en fonction du temps.

C. Reconstruction du vecteur vitesse

La phase Doppler est de façon approchée la projection du vecteur vitesse sur l'axe de réception. Trois mesures dans trois directions différentes suffiraient alors pour remonter au vecteur vitesse. En réalité, une quatrième mesure dans un quatrième axe est ajoutée (fig 7). Le vecteur vitesse est estimé par moindres carrés ce qui revient à chercher la pseudo inverse d'une matrice 4×3 [9].

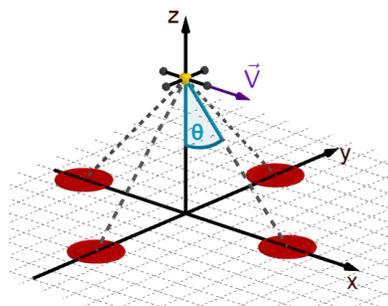


Fig. 7. Schéma du SeapiX en déplacement selon le vecteur vitesse \vec{V} quand on observe le fond selon un angle d'incidence θ . Les taches rouges représentent les empreintes du faisceau avant, arrière, bâbord et tribord combinaison de la directivité aux émissions, et des formations de voies à la réception.

$$\begin{pmatrix} \sin \theta & 0 & -\cos \theta \\ -\sin \theta & 0 & -\cos \theta \\ 0 & \sin \theta & -\cos \theta \\ 0 & -\sin \theta & -\cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Phi_A \\ \Phi_B \\ \Phi_C \\ \Phi_D \end{pmatrix} \frac{\lambda}{4\pi\Delta t} \quad (3)$$

avec Φ_A , Φ_B , Φ_C et Φ_D les 4 phases Doppler sur les 4 empreintes du faisceau avant, arrière, babord, et tribord pour un angle θ d'incidence d'observation donné et v_x , v_y et v_z les composantes x , y et z du vecteur vitesse \vec{V} .

V. RÉSULTATS

La vitesse du SeapiX selon une voie de réception constante θ donnée est comparée à la vitesse du filtre de navigation (la vérité terrain) ramenée dans le référentiel du SeapiX, synchronisées temporellement (voir fig. 9). La moyenne des différences est le biais. L'écart moyen est l'écart-type.

Nous comparons trois manières d'estimer la vitesse dans le tableau de la figure 8. Dans le mode 1, nous considérons la vitesse estimée en travaillant à un seul angle $\theta = 30^\circ$. Dans le mode 2, nous moyennons les vitesses obtenues pour des angles compris entre 28° et 30° . Enfin, dans le mode trois nous moyennons les vitesses estimées sur une plage plus grande d'angles allant de 16° à 60° .

Nous nous intéressons principalement au biais et à l'écart type de la composante x de la vitesse (v_x), puisque le bateau se déplace en ligne droite le long de l'axe x . Nous nous intéressons secondairement au biais sur la composante y de la vitesse (v_y). La vitesse y devrait être nulle en moyenne comme son biais. Il s'agit d'un indicateur du mauvais alignement entre le SeapiX et la centrale inertielle.

Mode	Biais sur v_x	Écart-type sur v_x	Biais sur v_y
1	-6,7	260	-68,1
2	-6,3	164	-68,8
3	-31,1	72,5	- 75,2

Fig. 8. Tableau des biais et des écart-types en $mm.s^{-1}$ de trois modes d'estimation de la vitesse

Premier constat : moyenner les vitesses sur un intervalle trop grand (mode 3) a multiplié le biais sur v_x par 5. En effet, on observe un biais plus important aux incidences plus fortes et plus faibles. Ainsi, la moyenne de ces vitesses plus ou moins fortement biaisées donne une moyenne plus biaisée. Les DVL classiques travaillent à 30° d'incidence [10].

Deuxième constat : moyenner les vitesses sur un intervalle plus grand diminue l'écart-type sur v_x . Cela s'explique par le fait que la vitesse est obtenue à partir d'un nombre plus important de points sur le fond. L'écart-type diminue quand l'incidence augmente. En effet, l'étalement du faisceau devient plus important sur le fond, la vitesse est estimée alors sur un plus grand nombre de points.

Troisième constat : Le biais sur v_y est élevé, alors que la vitesse le long de l'axe y est censée être nulle. Un mauvais alignement entre la centrale inertielle et le SeapiX provoque une mauvaise séparation des vitesses v_x et v_y .

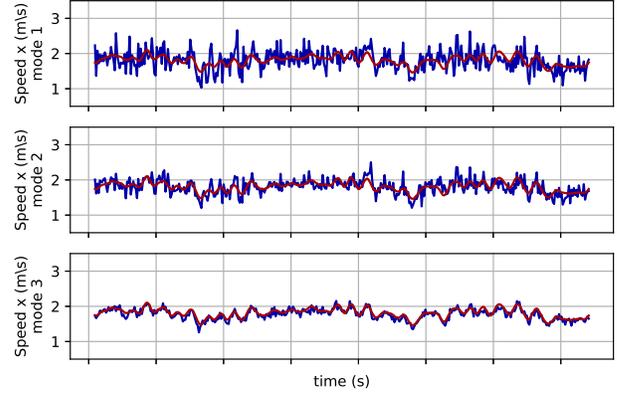


Fig. 9. Comparaison entre les vitesses v_x mesurées par le SeapiX des trois modes (bleu) et le RTK GNSS-IMU (rouge) dans le plan du SeapiX

VI. CONCLUSION

Nous avons pu montrer théoriquement puis expérimentalement, qu'il était possible d'estimer la vitesse d'un véhicule sous marin en déplacement grâce à l'utilisation d'un SMF en remplacement d'un DVL classique. Cette expérimentation petit fond a permis de valider les modèles, de mettre au point les algorithmes, de travailler sur des signaux réels et surtout d'anticiper des difficultés pour préparer la prochaine expérimentation qui sera en grand-fond (300m de profondeur).

REMERCIEMENT

Nous remercions la société iXblue pour la préparation et le bon déroulement de la mission en mer.

REFERENCES

- [1] Pinto, M. A. (2018, October). Split-beam Range-gated Doppler Velocity Sonar for Operations at High Altitude above the Seabed. In OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston (pp. 1-6). IEEE.
- [2] Gade, K. (2004). NavLab, a generic simulation and post-processing tool for navigation.
- [3] Jalving, B., Gade, K., Svartveit, K., Willumsen, A. B., & Sorhagen, R. (2004). DVL velocity aiding in the HUGIN 1000 integrated inertial navigation system.
- [4] Miller, K., & Rochwarger, M. (1972). A covariance approach to spectral moment estimation. IEEE Transactions on Information Theory, 18(5), 588-596.
- [5] Taudien, J., & Bilén, S. G. (2016, September). Quantifying error sources that affect long-term accuracy of Doppler velocity logs. In OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey (pp. 1-10). IEEE.
- [6] Matte, G., Charlot, D., Lerda, O., N'Guyen, T. K., Giovanni, V., Rioblanco, M., & Mosca, F. (2017, December). SeapiX: an innovative multibeam multiswath echosounder for water column and seabed analysis. In Hydro17 Conference Proceedings (pp. 21-23).
- [7] Pinto, M. A. (2018, October). Long Term Accuracy of Synthetic Aperture Sonar Micronavigation using a Displaced Phase Centre Antenna. In OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston (pp. 1-6). IEEE.
- [8] Phillips, W., Hailey, C., & Gebert, G. (2000, August). A review of attitude kinematics for aircraft flight simulation. In Modeling and Simulation Technologies Conference (p. 4302).
- [9] Brokloff, N. A. (1994, September). Matrix algorithm for Doppler sonar navigation. In Proceedings of OCEANS'94 (Vol. 3, pp. III-378). IEEE.
- [10] Taudien, J. Y. (2018). Doppler Velocity Log Algorithms: Detection, Estimation, and Accuracy. The Pennsylvania State University.