

Extraction d'une réalité tridimensionnelle du fond marin à partir d'un sonar interférométrique

Christophe SINTES , Michel LEGRIS ** et Basel SOLAIMAN ***

*IGESMA, B.P 42, 29240 Brest-Naval, France

christophe.sintes@enst-bretagne.fr

**ENSIETA, 2 rue François Verny , 29240 Brest-Naval, France

legrismi@ensieta.fr

***ENST-Bretagne, B.P 832, 29285 Brest cedex, France

Basel.solaiman@enst-bretagne.fr

Résumé. Cet article concerne l'aide à la compréhension de scènes sous marines grâce à l'utilisation d'un sonar interférométrique commercial prototype. Il s'agit pour l'opérateur sonar de ne plus visualiser une scène bidimensionnelle, mais grâce à l'interférométrie il est possible de visualiser cette même scène de manière tridimensionnelle, ce qui facilite la recherche et la classification d'objets. Ce sonar se révèle être un outil est bien adapté à l'exploration des fonds sous-marins, parce qu'il fournit une image sonar latérale de haute définition, et en même temps une image bathymétrique à une résolution assez proche voir identique, ce qui autorise la transformation du pixel de l'image sonar en voxel sans recalage. Ce passage d'une information 2D à une information 3D permet du coup de corriger tous les défauts de représentation des données et ainsi de faciliter les post traitements. Cette étude présente les concepts généraux de l'interférométrie et ses limitations de fonctionnement essentiellement dues au bruit. En effet, l'interférométrie qui est une méthode de triangulation d'écho, est handicapée par l'ambiguïté de la phase interférométrique, parce que cette triangulation est liée à un délai entre deux antennes modulo la longueur d'onde émise. Le Groupe d'Etudes Sous Marine de l'Atlantique a acheté un sonar interférométrique et a développé un processus général pour réduire ces erreurs d'ambiguïté. La conclusion principale de cet article concerne l'application potentielle de ce sonar et du processus associé à l'étude haute résolution, d'épaves, de petits objets, et pipelines. La vitesse d'utilisation permet de l'employer sur de grands espaces. La qualité des données rend la reconstruction 3D possible en vue d'une visualisation interactive.

1 Introduction

La bathymétrie est une information très instructive pour comprendre l'environnement d'une scène observée. La principale difficulté concerne l'obtention de cette information qui est le plus souvent issue de sondeurs acoustiques. Pour ces derniers, la résolution de la cellule d'insonification dépend de l'altitude du sondeur au-dessus du fond de la mer, car la taille de la cellule d'insonification est directement liée à l'ouverture du faisceau. La

Extraction d'une réalité tridimensionnelle du fond marin à partir de sonar interférométrique

bathymétrie est estimée par une analyse temporelle du temps de trajet de l'onde entre le sondeur et le fond sous-marin. La qualité de cette mesure est en générale bonne parce que le système écho-sondeur est spécialement étudié pour cela. Beaucoup d'informations peuvent être dérivées de celle-ci : il est possible créer des modèles 3D de l'environnement. L'information de la puissance réverbérée par le fond est également intéressante car elle produit une image du fond (nuances de gris corrélées avec des modifications du relief ou de la nature du sol). Cependant, la résolution ainsi que l'angle d'insonification (vertical) sont mal adaptés à la détection ou à la classification d'objets. Ainsi traditionnellement, l'information issue de l'écho sondeur est fusionnée à celle d'un sonar latéral, ne délivrant que de l'information image mais de résolution très supérieure. En effet, le sonar latéral produit des images réalistes du fond des océans, en transmettant périodiquement des impulsions acoustiques orthogonales à la direction d'avance du sonar de manière identique aux sondeurs multifaisceau. Cependant pour garantir des insonifications sous des angles rasants, les sonars latéraux sont portés non pas par le navire support, mais par des poissons remorqués, garantissant une altitude constante et faible au dessus du fond en regard de la portée utile. L'image latérale rend compte de manière indirecte de la bathymétrie de la zone observée sans la quantifier. Le sonar en navigant près du fond forme une image crépusculaire qui amplifie les ombres des objets présents et facilite leur détection.

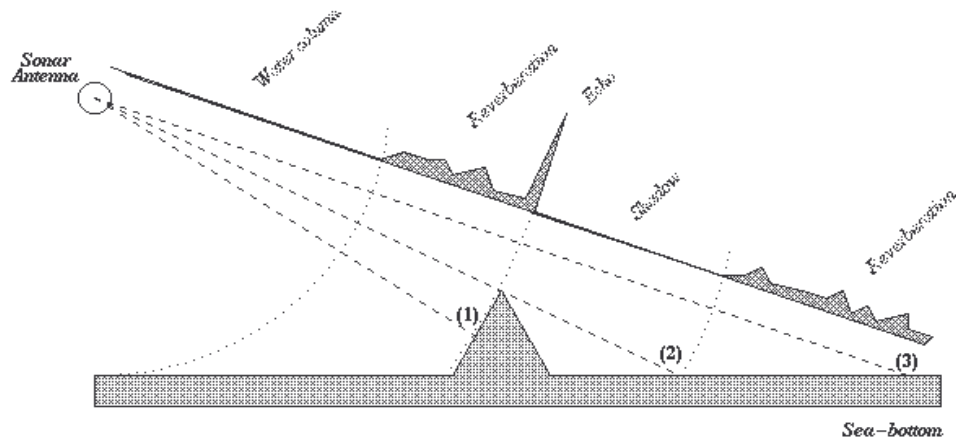


FIG. 1 – Principe du sonar latéral

Plus généralement ces sonars haute résolution fournissent de nombreux détails qui peuvent être interprétés. Les sonars latéraux insonifient le fond de la mer avec une grande ouverture verticale et une ouverture étroite dans le sens horizontal. La force de l'écho ou backscattering est enregistré en fonction du temps. Cette géométrie d'insonification est différente de celle des sondeurs multifaisceau plus complexes qui forment des voies pour différents angles pour des incidences plus verticales. De ce point de vue, le sonar latéral et le sondeur multifaisceau sont très complémentaires, mais la fusion de l'image latérale et de la

bathymétrie sondeur multifaisceau est difficile, parce que en général, la scène est observée sous deux points de vue différents avec leurs propres défauts de navigation (le sonar latéral est monté sur un poisson remorqué et le l'échosondeur sur un navire de surface). De plus, les informations à fusionner (image et bathymétrie) sont de nature différentes.

Des sonars latéraux récents ont été conçus pour produire à partir de la même image, une information de backscattering et une information bathymétrique en utilisant des méthodes interférométriques. Ces méthodes sont basées sur la détection de l'arrivée angulaire de l'onde plane réverbérée par le fond. Avec la connaissance de l'altitude de sonar, du temps d'arrivée du signal et de sa direction d'arrivée angulaire, il est possible de calculer la bathymétrie de chaque point présent dans la scène observée. Ces méthodes constituent une vraie amélioration comparée aux méthodes de fusion de bathymétrie et à l'image, enregistrées pour deux instants et par de deux capteurs différents. De ce point de vue, l'interférométrie permet de transformer le pixel de l'image sonar haute définition en voxel. Cet élément tridimensionnel permet du coup de corriger tous les défauts de l'image sonar liés à sa méthode d'acquisition (échantillonnage temporel) comme les zones de raccourcissement, les zones d'inversion. L'effet de raccourcissement, lié au relief local ainsi qu'à la prise de vue oblique, se définit comme une sorte de compression de certains éléments sur l'image ; ceux-ci subissent un déplacement en direction du capteur. Cette déformation pour des points du fond distincts mais équidistants, peut aller jusqu'à les confondre sur l'image sonar. La zone d'inversion apparaît lorsque la pente du terrain est supérieure à l'angle de visée du sonar (par exemple, lors de fortes pentes faisant face à l'antenne). Dans une telle configuration, les cellules du bas de la pente d'un versant éclairé sont imagées à des distances de rang supérieur à celles situées plus haut sur la pente. L'exemple typique correspond à la présence d'un mat vertical dans une scène dont le sommet est imagé avant sa base !

L'inconvénient principal des méthodes interférométriques concerne leurs robustesses faibles dans un environnement bruyant et les ambiguïtés de 2π de la phase utilisée pour calculer le retard interférométrique. Cet article propose une méthode de réduction des erreurs d'ambiguïté de phase avec la même résolution de que celle l'image reposant sur une approche fusion. Les applications de cette bathymétrie issue de ce procédé sont nombreuses : détection d'objets et recherche d'épaves, compréhension de l'environnement... Cette représentation 3D des données facilite le travail des post traitements et des experts.

2 Concepts de base

L'expérience traditionnelle pour illustrer le principe de l'interférométrie est l'expérience des fentes d'Young [Goodman, 1985]. Une lumière monochromatique (c.-à-d. une seule fréquence porteuse) est diffractée par deux fentes et crée une figure lumineuse composée d'une alternance de franges (les lignes accentuées et des lignes ombragées) sur une feuille blanche placée en arrière. Ceci peut être expliqué par la résultante lumineuse de chaque point de la feuille blanche placée en arrière qui est issue de la superposition de deux sources de lumières cohérentes. L'intensité à chaque point est indiquée par (1) :

$$(1) \quad I = \langle E_1^2 \rangle + \langle E_2^2 \rangle + 2E_1E_2 \langle \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \rangle$$

où, E_1 et E_2 dénotent l'amplitude de champs électromagnétiques correspondants aux deux sources cohérentes, φ_1 et φ_2 leurs phases, et le symbole $\langle \cdot \rangle$ dénote la moyenne temporelle durant un intervalle de temps de longueur égal à celui des trains d'onde. L'intensité résultante est modulée par la différence de phase (c.-à-d. la différence de la longueur des deux chemins de lumière).

La transposition du principe au sonar interférométrique est simple (cf. figure 2). Les fentes sont remplacées par deux rangées acoustiques et l'effet de la feuille blanche est calculé par les quantités $S_a S_b^*$ où S_a , S_b sont les signaux complexes reçus sur chaque rangée et (*) dénote le conjugué complexe.

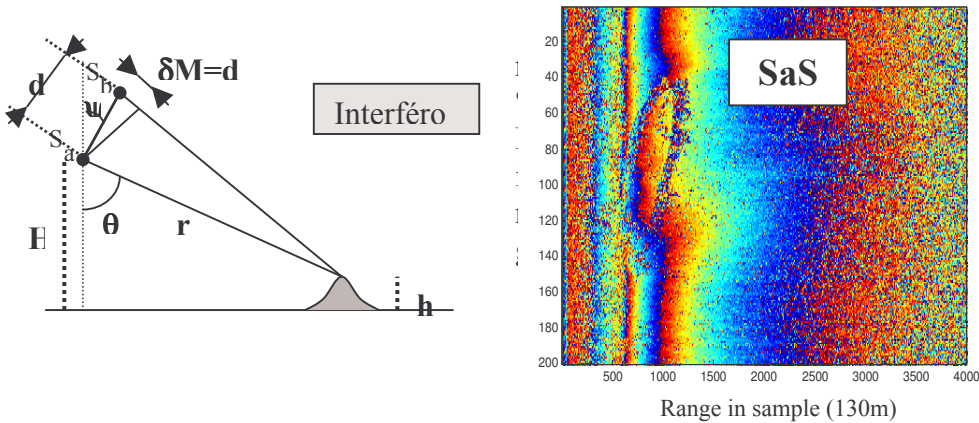


FIG. 2 - Principe d'estimation de l'angle θ et le calcul de $S_a S_b^*$

Sur cette figure, δM dénote la différence de longueur de chemin optique. Le lien entre la différence de phase et l'angle d'arrivée du front d'onde est donné par (2).

$$(2) \quad \Delta\varphi = \frac{2\pi d \cos(\theta + \psi)}{\lambda}$$

où " d " est la ligne de base, H l'altitude à la verticale du sonar et λ la longueur d'onde. En conclusion, l'altitude ' h ' d'une cellule de résolution est simplement calculée par:

$$(3) \quad h = H - r \cos(\theta)$$

L'inconvénient principal de la technique interférométrique est la présence de bruit auquel se superpose l'ambiguïté de la différence de phase. En effet la quantité δM peut être supérieure à une longueur de d'onde, mais la différence de phase ne peut apprécier qu'un délai inférieur à 2π comme montré sur la figure 3 .

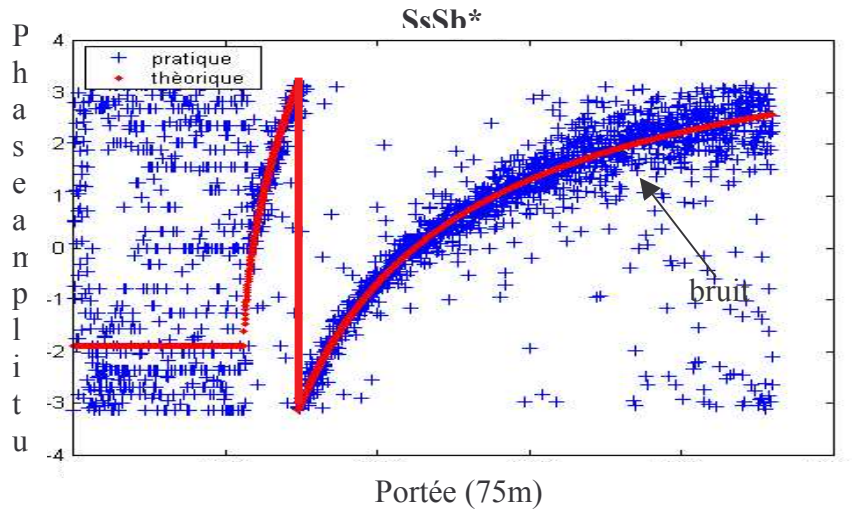


FIG. 3 - Différence de phase expérimentale (bleue) et théorique (rouge)

En conséquence, la différence de phase n'est pas directement utilisable parce qu'elle n'est pas représentative de l'angle d'arrivée du front d'onde. Par la suite, on parle de retard fin pour la quantité relative à la différence de phase ambiguë et de retard grossier pour le nombre entier de périodes de porteuse dont est constitué le retard global correspondant à δM . Ces notions sont plus communément appelées retard de phase et de groupe. Dans notre cas, la somme des deux fournit le retard global.

3 Limites de l'interférométrie

3.1 Sources de bruit

Nous considérons 4 sources de bruit qui se combinent et qui sont majoritairement responsables de la diminution du rapport de signal sur bruit:

la décorrélation angulaire : il faut remarquer que la valeur de niveau gris d'un pixel de l'image de sonar, provient de la contribution cohérente de plusieurs réflecteurs élémentaires contenus dans la cellule de résolution. Les énergies réverbérées par chacun de ces réflecteurs peuvent interférer jusqu'à annuler la puissance totale ; dans ce cas la différence de phase reçue est une grandeur aléatoire: c'est le phénomène de speckle. Le signal interférométrique peut lui aussi être victime de ce phénomène de contribution cohérente qui peut fluctuer fortement pour de petites variations d'angle. Il s'agit d'une décorrélation angulaire. Les hypothèses classiques de modélisations supposent des réflecteurs élémentaires uniformément répartis et distribués de manière continue sur le fond sous-marin. Cette hypothèse est la plus défavorable [Jin et Tang, 1996],[Goodman, 1985].

la décorrélation spatiale : Ce phénomène s'appelle également l'effet '*sliding foot print*' et correspond à un principe d'optique connu. Les figures d'interférence obtenues par diffraction de lumière monochromatique au travers fentes d'Young sont de moins en moins contrastées du centre à l'extérieur. Ce phénomène est lié à la longueur des cohérence de l'onde lumineuse utilisée. Plus la différence de phase est importante moins la période de l'intégration de l'interférence est importante. Ainsi, plus la longueur de corrélation est grande plus la lumière utilisée est monochromatique et plus le contraste de la figure augmente. Pour le cas du sonar, la longueur de cohérence est liée à la longueur de l'impulsion émise et est proportionnelle à :

$$(4) \quad \xi = \frac{c \tau}{2} - \delta M$$

τ est la longueur d'impulsion et c est la célérité du milieu. ξ correspond à l'intervalle de temps pendant lequel les deux capteurs interfèrent. ξ peut être interprété comme la partie commune des deux empreintes temporelles générées par chacun des capteurs interférométriques : les deux capteurs ne sont pas situés à la même distance du fond et leurs empreintes sur le fond sont légèrement décalées. Ainsi, la contribution cohérente ne doit tenir compte que de cette superposition partielle. ξ ramené en distance sur l'axe de visée donne :

$$(5) \quad \xi = \frac{c\tau}{2} - \delta M = \frac{c\tau}{2} - d \cos(\theta + \psi)$$

Si on ramène cette longueur à la taille de la cellule de résolution servant réellement à l'interférométrie par projection sur le fond, on obtient :

$$(6) \quad \xi = \frac{c\tau}{2 \sin \theta} - \frac{d \cos(\theta + \psi)}{\sin \theta}$$

La distance sur le fond correspondant au décalage δM est égal à [6] :

$$(7) \quad \Delta x = \frac{d \cos(\theta + \psi)}{\sin(\theta)} .$$

l'impact des trajets multiples: Les trajets multiples constituent une source de bruit importante pour le processus d'interférométrie. En fait, le signal reçu est constitué d'une contribution liée au chemin direct, et d'une multitude de contributions plus ou moins importantes correspondant à des trajets secondaires. Ces contributions secondaires ont pour effet de parasiter le front d'onde provenant de la direction d'écoute et de bruite l'estimation de la direction d'arrivée du front d'onde principal.

la propagation et l'atténuation : le niveau du signal est affaibli par la propagation et le rapport signal sur bruit de la différence de phase aussi [Urick, 1983].

3.2 Les sources d'erreur

Le bruit dans sa globalité est une difficulté supplémentaire à la détermination de la différence de phase absolue existant entre les deux capteurs interférométriques. Néanmoins, il est souvent possible par analyse de la différence phase de remonter au déphasage entre capteurs interférométriques en utilisant différentes méthodes exposées ci-après. Néanmoins deux phénomènes sont sources d'erreurs systématiques. Il s'agit du phénomène de décorrélation angulaire et des trajets multiples. L'effet des trajets multiples est visible dès que le niveau de réverbération du fond est faible comparé à celui de la surface. Dans ce cas, l'altitude mesurée pour un échantillon temporel correspond à une altitude comprise entre la surface et le fond de mer! Ainsi, il est nécessaire de détecter et d'ignorer ces points de mauvaises qualité bathymétrique. Le deuxième type d'erreur systématique concerne une décorrélation angulaire importante qui est souvent associée à un module d'intercorrélation faible. De la même manière, il faut éviter d'incorporer ce type d'échantillons dans tout traitement, sous peine de dégrader la qualité des traitements ultérieurs. Par conséquent, l'étude des phénomènes perturbateurs et des sources d'erreurs permet d'identifier des échantillons de mauvaise qualité et permettra d'améliorer les performances des traitements en aval [Denbigh, 1989].

4 Solutions pour débiaiser la phase interférométrique

4.1. Déroulement de phase

La méthode traditionnelle pour débiaiser de $2k\pi$ la phase interférométrique consiste à détecter les sauts de phase qui correspondent à une transition brutale d'une quantité proche de 2π quand le signal atteint les bornes de l'intervalle de définition de la différence de phase, soit $-\pi$ ou π . Une solution pour détecter ces sauts, consiste à utiliser un estimateur différentiel qui n'est sensible qu'aux brusques transitions de grande amplitude. Généralement, le seuil de détection de cet estimateur est fixé à π . Ainsi quand la transition entre deux points voisins atteint en valeur absolue π , le système considère qu'il existe un saut de phase et corrige ainsi la différence de phase comme cela est démontré sur la 0. Il est

Extraction d'une réalité tridimensionnelle du fond marin à partir de sonar interférométrique

possible de résumer l'algorithme de correction de biais de la différence de phase interférométrique comme suit [Masnadi, 1992]:

$$(8) \quad \begin{cases} \text{si } \arg(SaSb_n^*) - \arg(SaSb_{n-1}^*) > \pi \text{ alors } \forall i \geq n \arg(SaSb_i^*) = \arg(SaSb_i^*) - 2\pi \\ \text{si } \arg(SaSb_n^*) - \arg(SaSb_{n-1}^*) < -\pi \text{ alors } \forall i \geq n \arg(SaSb_i^*) = \arg(SaSb_i^*) + 2\pi \end{cases}$$

Cet algorithme qui déroule la différence phase peut commettre beaucoup d'erreurs dès que la puissance du bruit devient importante ce qui entraîne un taux trop important de fausses alarmes

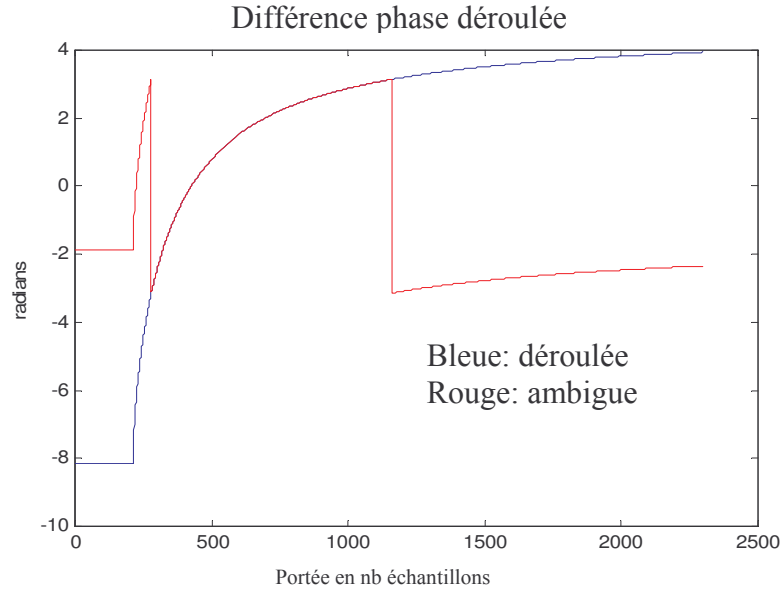


FIG. 4 - Un exemple de déroulement de phase

Une solution permet de contourner cette difficulté qui consiste à réduire le niveau du bruit. La technique traditionnelle est basée sur un filtrage passe bas des données. Cette technique donne des résultats intéressants mais la résolution en est diminuée. Par ailleurs dans certains cas, il est nécessaire de réduire de manière importante la résolution avant d'atteindre un niveau de bruit acceptable.

La phase filtrée est donnée par l'estimateur de maximum de vraisemblance

$$(9) \quad \Delta \bar{\varphi} = \arg\left(\sum_i SaSb_i^*\right)$$

Le défaut majeur du processus de déroulement de phase est de commettre une erreur de détection qui n'est pas localisée seulement au niveau du pseudo saut de phase, mais elle est propagée sur tous les échantillons à traiter jusqu'à la fin de la portée.

4.2. Processus d'intercorrélation

Une autre technique pour estimer le biais de 2π consiste à déterminer avec les techniques de traitement de signal traditionnelles, la différence de temps d'arrivée du front d'onde sur les deux capteurs interférométriques. : il s'agit de la technique utilisant l'intercorrélation des deux signaux interférométriques. Comme le montre l'équation ci-dessous.

$$(10) \quad \tau = \left\{ \tau / \max \left(\int_T Sa(t) Sb^*(t - \tau) dt \right) \right\}$$

Cette technique est réellement intéressante car elle permet d'accéder à une différence de temps d'arrivée des fronts d'onde qui est référencée, ce qui n'est pas le cas du déroulement de phase. Par ailleurs, cette approche limite l'impact de la décorrélation spatiale, car les deux signaux sont décalés temporellement pour obtenir le meilleur niveau de corrélation. Cette technique correspond à l'estimateur du maximum de vraisemblance déjà évoqué mais dans le cadre d'une sommation continue. La meilleure estimation est donnée par la borne basse de Cramer Rao. Dans le cas de signaux gaussiens, elle vaut :

$$(11) \quad \sigma_\tau \geq \sqrt{\frac{3}{\pi^2 TW SNR}} \frac{1}{W}$$

Avec σ_τ qui désigne l'écart type de l'estimation du retard grossier, T est la durée d'émission, W la largeur de bande utilisée et SNR le rapport signal sur bruit. Généralement le produit TW est assimilé aux nombres de points indépendants utilisés pour l'intercorrélation. Cette valeur est à comparer avec la précision obtenue sur le retard fin (f est la fréquence de la porteuse) :

$$(12) \quad \sigma_\tau \geq \sqrt{\frac{1}{4\pi^2 f^2 SNR TW}}$$

La différence entre ces deux estimations concerne la largeur de bande et la fréquence de la porteuse. Ainsi la détermination du retard grossier est en relation avec la largeur de bande utilisée et la mesure interférométrique avec la longueur d'onde utilisée. Evidemment la mesure de retard fin est toujours meilleure que celle de retard grossier (d'où son utilisation), mais reste ambiguë.

4.3. Le principe du vernier

La méthode du vernier est différente du principe évoqué plus haut parce qu'elle utilise trois antennes interférométriques, soit deux couples de baselines (ligne de base) pour lever cette ambiguïté. La différence de phase pour un couple est donnée par:

$$(13) \quad \text{mod}(\partial\varphi, 2\pi) + 2n\pi = \frac{2\pi d \cos(\theta + \psi)}{\lambda}$$

Chaque couple de capteur ou baseline fournit une famille de solutions correspondant à plusieurs fronts d'onde possibles produits par l'ambiguïté de phase. Or le front d'onde physique est unique et l'angle vu par les deux baselines est identique si les capteurs sont alignés. Ainsi avec deux couples de capteurs, seul un membre de chaque famille est commun à l'autre famille (superposition des solutions, cf. la figure 5). Nous pouvons trouver un couple de naturels n_1 et n_2 vérifiant:

$$(14) \quad \frac{\text{mod}(\partial\varphi_1, 2\pi)\lambda_1}{2\pi d_1} + \frac{n_1\pi}{d_1} = \cos(\theta + \psi) = \frac{\text{mod}(\partial\varphi_2, 2\pi)\lambda_2}{2\pi d_2} + \frac{n_2\pi}{d_2}$$

Le signal expérimental ne permet pas toujours la superposition exacte ; il reste toujours une petite erreur ε due au bruit. La technique utilisée pour trouver les couples (n_1, n_2) repose sur le choix des deux membres des familles solution les plus proches. Si cette erreur dépasse l'efficacité du vernier soit $\frac{1}{2} \min_{(n_1, n_2) \neq (0,0)} \left| \frac{n_1\lambda}{d_1} - \frac{n_2\lambda}{d_2} \right|$, il sera impossible de faire la différence entre la solution vraie et un front d'onde faux [Denbigh, 1989].

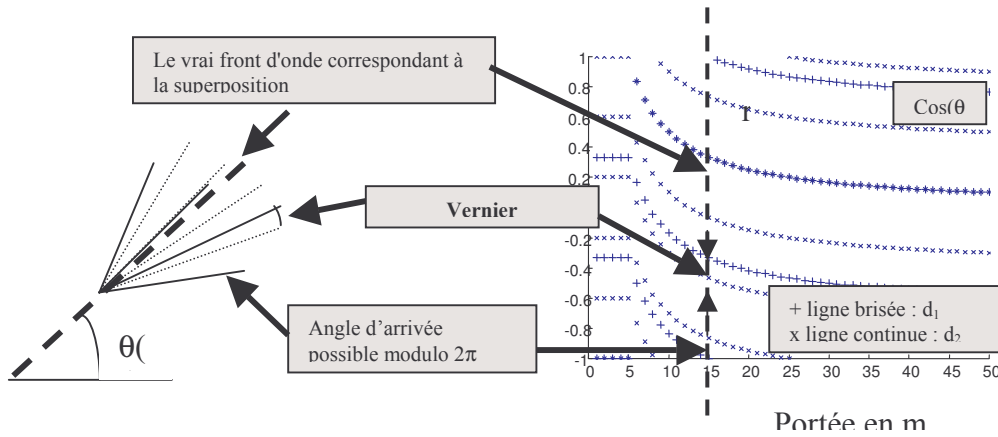


FIG. 5 - Interpretation du concept du vernier

Dans notre cas les distances d_1 et d_2 sont fixées par le constructeur du sonar. Il est évident que pour une baseline totale $d_3 = d_1 + d_2$ donnée, il existe plusieurs efficacités possibles avec des extrema. Seul un choix judicieux pour une longueur totale donnée garantit une efficacité du vernier maximum. Sans entrer dans le détail, cette performance est en relation avec des notions de congruence étendues à des fractions de longueur d'onde et à la dynamique du vernier (autrement dit l'ouverture angulaire en site de l'antenne). Dans le cas du sonar prototype, le maximum d'efficacité pour $d_3 = 4\lambda$, n'est pas atteint. Le dimensionnement du vernier doit également tenir compte de la puissance du bruit. Ce dernier influe sur la longueur de la baseline totale qui définit elle même une efficacité maximum compatible avec la puissance du bruit. Par ailleurs, si la variance sur un échantillon est importante est il possible de recourir à des méthodes d'estimation probabiliste (régression linéaire de la différence phase, etc.) afin de faciliter la détermination de l'ambiguïté de

l'échantillon courant. Hélas, cette estimation se fait au détriment de la résolution, or l'idée de cette étude est avant tout de travailler avec une résolution identique à celle de l'image voir légèrement dégradée pour utiliser la notion de voxel.

5 Algorithme et résultats

5.1. Despecklisation de la phase

Généralement, en raison de la puissance du bruit très variable avec la portée sonar, le vernier fonctionne de manière sous optimale. En vue d'améliorer son fonctionnement la différence de phase est préfiltrée, ce qui permet de réduire la variance du bruit et d'avoir une erreur pour les superpositions de courbes en dessous de l'efficacité du vernier. Le défaut majeur de ce type de filtrage concerne la perte de résolution occasionnée. L'idée d'un processus de despecklisation basé sur l'analyse de multirésolution, est d'améliorer la qualité du signal par un filtre utilisant une fenêtre d'analyse auto- adaptative qui adapte la taille du filtre en fonction du gradient des niveaux de gris de l'image. Elle permet d'atteindre un meilleur SNR et de préserver la résolution. Cette opération est effectuée avec une analyse invariante en translation basée sur des ondelettes splines.

5.2. Le vernier paramétrique

L'inconvénient principal de l'algorithme du vernier vient de son comportement de type 'boîte noire' : ce dernier ne permet pas mettre en place un seuil pour la détection des sauts de phase. Quand le bruit dépasse l'efficacité vernier pour peu que celui-ci soit mal dimensionné, quelques erreurs de lever d'ambiguïté peuvent se produire : ce seuil est déterminé par la configuration géométrique du vernier. Pour éviter ce comportement tout ou rien, l'idée principale de notre approche est de fusionner les informations issues de la technique vernier et des techniques classiques de déroulement de phase qui sont paramétrables pour la valeur du seuil. En effet, il est possible de placer un seuil sous lequel la transition de la différence de phase entre deux points voisins (sur la portée sonar) peut être considérée comme continue, de manière indépendante du comportement du vernier (évolution naturelle de la différence de phase avec la distance). Le seuil appelé intervalle de confiance, représente la distance séparant la valeur des différences de phase de deux échantillons voisins, c'est à dire la valeur de la transition entre deux échantillons. L'idée est de considérer les points fiables du point de vue de la continuité des transitions des différences de phase : en supposant que les échantillons corrects représentent la majorité des points, nous considérons les autres comme des discontinuités isolées. La valeur des transitions des différences de phase fournit uniquement une information de continuité. Par exemple, nous choisissons un intervalle de continuité rassemblant autour de la moyenne 90% du poids statistique de la distribution pour un échantillon donné. Si la transition entre deux points est en-dessous de l'intervalle de confiance, il y a continuité, si la distance est au-dessus de 2π - l'intervalle de confiance, il y a continuité, et présence d'un saut de phase. En revanche, si la distance est au-dessus de l'intervalle de confiance et au-dessous de 2π - l'intervalle de confiance, il est impossible de dire s'il y a ou pas un saut de phase. Les discontinuités correspondent à la présence de bruit ou à un problème de déroulement. Les discontinuités découpent la portée sonar en intervalles

de continuité sur lesquels l'évolution de la différence de phase est continue. La longueur des intervalles de confiance est basée sur la densité de probabilité analytique de la différence de phase dans le cas gaussien [Cooper et Wyndham, 1973][Middleton]:

$$(15) \quad p(\Delta\varphi) = \frac{(1-\mu^2)}{2\pi} \left(\frac{1}{1-Y^2} + \frac{Y}{(1-Y^2)^{3/2}} \left(\frac{\pi}{2} + \arcsin Y \right) \right)$$

avec: $Y = |\gamma| \cos(\Delta\varphi - \langle \Delta\varphi \rangle) = \mu \cos(\Delta\varphi - \langle \Delta\varphi \rangle)$, μ coefficient de corrélation intercapteurs et $\langle \Delta\varphi \rangle$ la valeur moyenne de la différence de phase.

Autrement dit, quand le vernier donne des valeurs d'ambiguïté de phase différente pour des points présents à l'intérieur d'un intervalle de continuité, le vernier se trompe. Mais si les résultats fournis par le vernier sont en majorité exacts, il devient possible de corriger ces derniers en s'appuyant sur la majorité, comme le montre la figure 6. La difficulté réside dans une prise de décision (vote majoritaire) pour des échantillons non stationnaires car la différence de phase est croissante sur un intervalle de continuité. L'idée retenue consiste à identifier l'empreinte de la majorité (issue du déroulement de la différence de phase) en dehors de toute considération de saut de phase et de venir comparer cette forme aux différentes courbes du vernier. Il faut noter que les différentes courbes apparaissant sur le diagramme du vernier, sont des translations les unes des autres, en raison de la mauvaise résolution des ambiguïtés. Cette technique permet d'identifier la courbe qui rassemble le plus de points et de la considérer comme courbe majoritaire. Une fois cette courbe majoritaire identifiée pour un intervalle de continuité donné, il devient possible de corriger les ambiguïtés erronées.

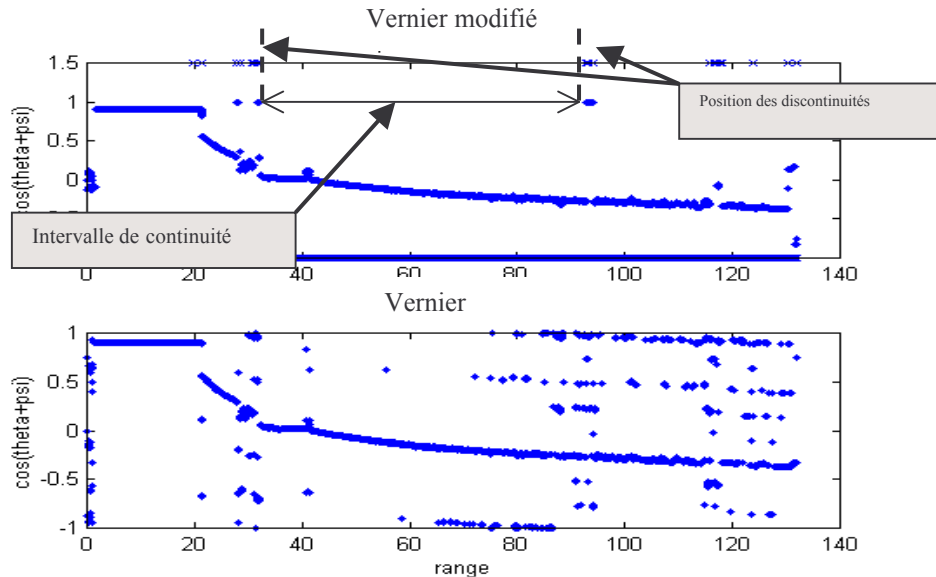


FIG. 6 - Exemple de correction d'ambiguïté de phase

Les limites de performances de cet algorithme sont fixées par deux quantités que sont l'efficacité du vernier et la taille maximale de l'intervalle de confiance. L'efficacité du vernier intervient toujours puisque le vernier doit permettre d'identifier la courbe majoritaire ; dans ce cas sur la densité de probabilité, si la moitié du poids de l'histogramme est distant de la valeur moyenne d'une quantité supérieure à la valeur de l'efficacité, il devient impossible d'identifier la courbe majoritaire. Ceci est la principale limitation de l'algorithme qu'il faut vérifier avant son utilisation.

La deuxième concerne le taux de non détection des discontinuités. En effet, l'intervalle de confiance permet d'identifier des discontinuités qui sont révélatrices de modification du régime du relief sous marin. Plus, l'intervalle augmente plus le risque croît. Il est souhaitable d'éviter de dépasser 10% d'erreur en utilisant les différences de phase des deux baselines. Ceci correspond à un taux d'erreur légèrement inférieur à la moitié de la limite de fonctionnement du vernier.

En terme de performance attendue, pour un fond moyennement réverbérant type sable avec une altitude du sonar au dessus du fond égale à 25m pour une portée de 150m, on peut espérer passer d'une portée réelle inférieure à 75m à une utilisation de la phase jusqu'à 120m pour un taux d'erreur de 10%. Dans l'exemple de la figure 6, l'utilisation est possible jusqu'à 130m, car le sonar navigue à plus de 40 m au-dessus du fond ce qui relève le SNR en fin de portée. Ces estimations de performances sont essentiellement limitées par la prédiction de performance sonar en terme de rapport signal sur bruit difficile à mettre œuvre sans calibration en bassin du système.

5.3. Résultats

Le GESMA a acheté il y a trois ans un prototype d'un sonar latéral interférométrique pour évaluer le gain apporté par l'interférométrie pour explorer le fond sous-marin. Ce sonar est un KLEIN 5400B. Avec le vernier paramétrique, le temps de calcul autorise un processus en temps réel, mais actuellement ce processus travaille en temps différé et fournit une image sonar despecklisée, plus une image bathymétrique. Le processus est entièrement automatique. La figure 7 présente une image despecklisée et la bathymétrie associée à chaque point. Le système procède émission sonar par émission sonar (soit ligne par ligne) selon les relations(2)(3). Grâce à ce calcul de la bathymétrie il devient possible de corriger les effets d'inversion et de raccourcissement des mats de l'épave ; en effet le mat présent sur le pont est imagé avant l'épave elle même rendant l'image non conforme. Grâce à un repositionnement tridimensionnel, il devient possible de corriger ces artéfacts comme le montre la figure 8. Ceci permet une bien meilleure compréhension de la scène.

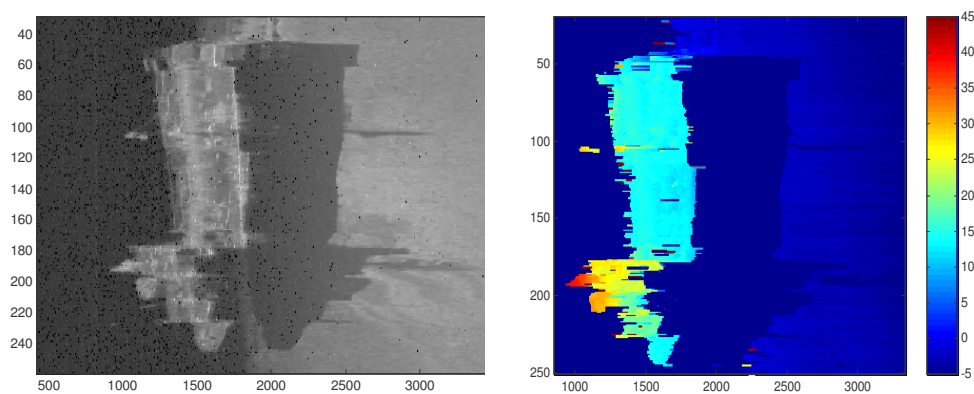


FIG. 7 - Image sonar et la bathymétrie associée

En utilisant Open GL, il est possible de créer une représentation 3D des volumes et beaucoup de détails de bathymétrie deviennent visibles. Par exemple, il est possible de distinguer sur cette épave le pont, la plate-forme, les différents mâts et le dôme de télécommunication. La fusion image sonar et bathymétrie est immédiate puisque l'interférométrie calcule l'élévation de chaque point de l'image. En particulier, on distingue très nettement le deuxième mat de charge présent sur le pont alors que ce dernier était noyé dans les échos des ponts sur l'image sonar.

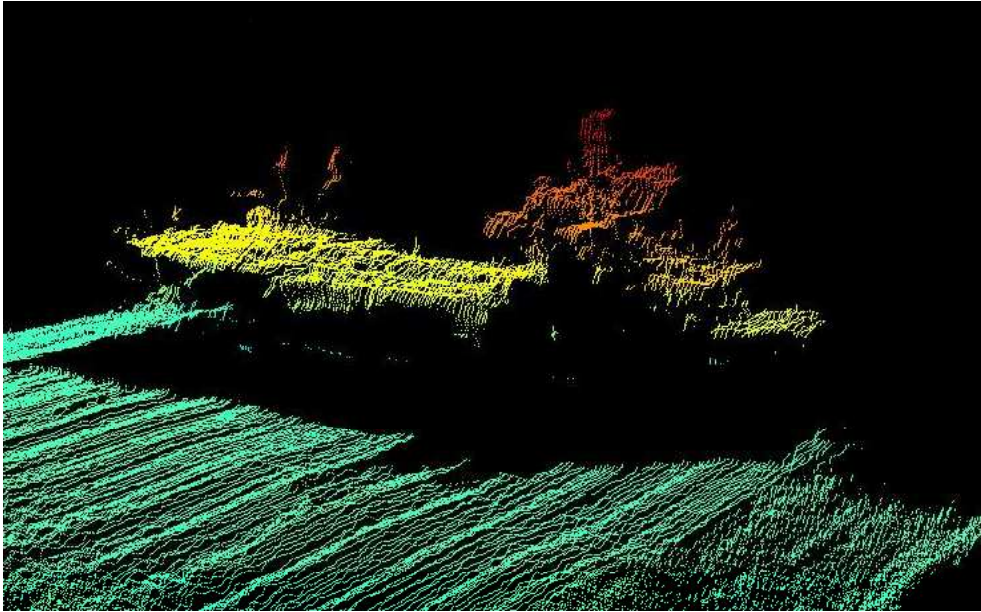


FIG. 8 - *Bathymétrie (vue 3D)*

Tous ces détails sont encore plus visibles sur la comparaison faite entre l'image sonar brute et la reconstruction tridimensionnelle de la scène intégrant la luminance des pixels de l'image sonar (cf. la figure 9). On perçoit l'amélioration de la représentation exsangue de zone d'inversion (cf. présence du fond marin dans l'ombre) ou de zone de raccourcissement (cf. le mat sur le pont).

Extraction d'une réalité tridimensionnelle du fond marin à partir de sonar interférométrique

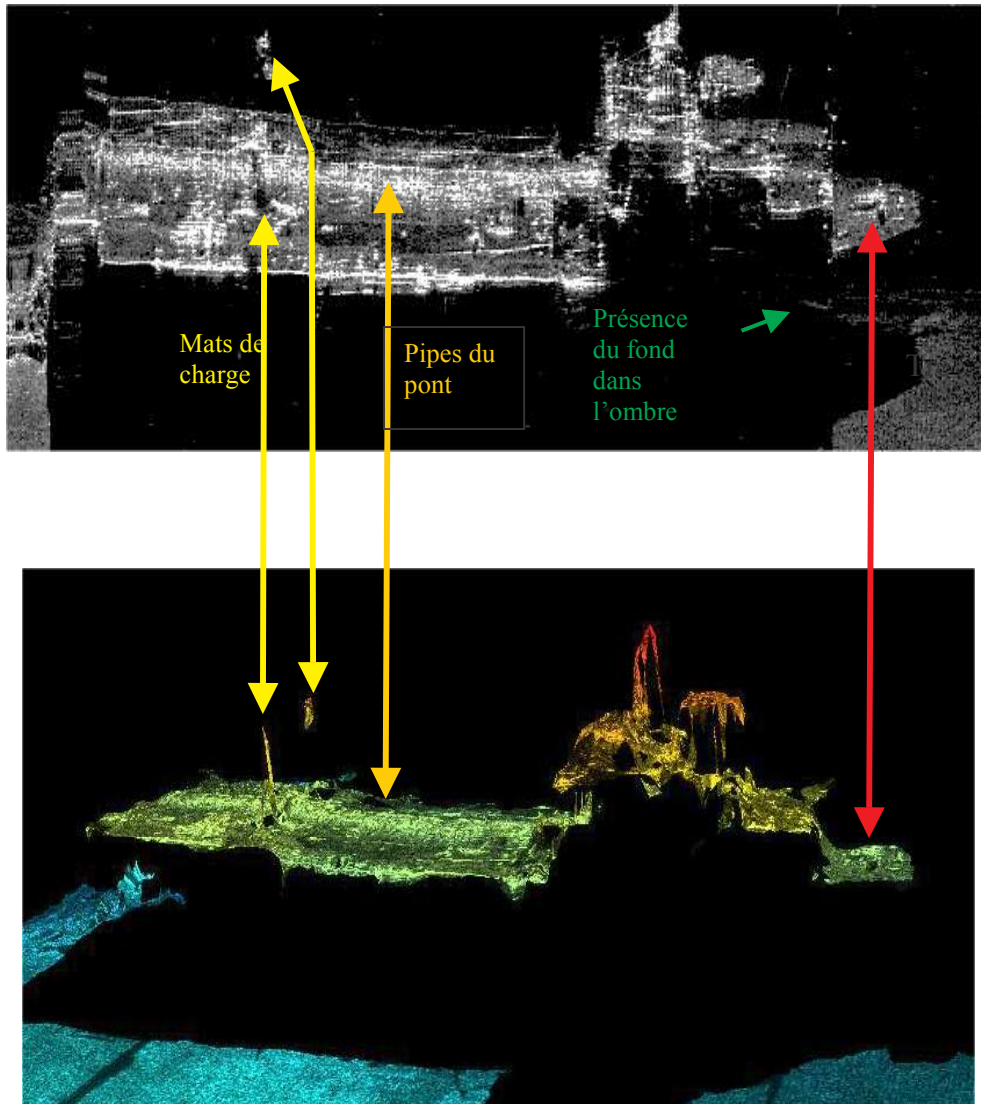


FIG. 9 - Démonstration du passage du pixel en voxel

6 Conclusions

En définitive, cette étude démontre l'intérêt que représente la représentation tridimensionnelle des données d'imagerie sonar. En effet, les défauts de représentation que

comporte l'image haute résolution sont un sérieux handicap à la compréhension de scène sous marine. Ceci rend difficile sa compréhension pour l'expert mais complique aussi le travail des post traitements. Il est clair que l'interférométrie couplée à l'image sonar permet de déterminer l'altitude des points présents dans l'image et de les transformer en voxels. La contre partie de cette technique est sa faible résistance au bruit et confine l'utilisation de l'interférométrie à de faibles portées sonar ou à des résolutions différentes entre l'image et la bathymétrie. La technique proposée démontre la possibilité d'augmenter la performance de l'interférométrie en identifiant des zones homogènes (intervalle de continuité) et en s'appuyant sur la notion de majorité qui n'est pas incompatible avec l'aspect fluctuant et non stationnaire avec l'évolution de la différence au cours de la portée sonar. De plus cette amélioration se fait sans perte de résolution, tout en autorisant tout type de traitement de la différence de phase en vue d'améliorer la qualité de l'estimation.

Aujourd'hui le KLEIN 5400B est encore un prototype, mais les missions effectuées par ce sonar, dans des conditions d'environnement témoigne d'un comportement fiable de l'algorithme de réduction des erreurs de lever d'ambiguïté de phase. Avec une résolution de 3 à 10cm par 10cm et une couverture de 2 fois 120m à 8 nœuds, ce sonar est bien conçu pour la surveillance côtière (entre 40m à 200m de profondeur). Enfin, il est possible d'améliorer la conception de ces sonars interférométriques en vue d'augmenter les performances d'investigation (bathymétrie) de ces appareils sur des missions types : survey d'épave, guerre des mines. Par ailleurs un dimensionnement adéquat de l'interféromètre permettra une réduction de la variance du relief et un meilleur fonctionnement du vernier, par voie de conséquence de l'algorithme.

Références

- [Goodman, 1995] J.W. Goodman, 'Laser Speckle and Related Phenomena', in Statistical Properties of Laser Speckle Patterns, J.C. Dainty, Ed. New York: Springer, 1985
- [Sintes, 1989] C. Sintes, ' Bruit interférométrique pour sonar latéral', internal report 4336 GESMA.
- [Denbigh, 1989] Philip N. Denbigh, 'Swath Bathymétrie : Principles of Operation and an Analysis of Errors', IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol 14, No 4, October 1989.
- [Cooper et Windham, 1973] D.C. Cooper and B.A. Wyndham, 'Comparison of Monopulse Techniques for Direction Finding in the Presence', IEE, Savoy Place, London, Eng. IEE Conf. Publ. 105, 1973, pp.154-159.
- [Jin et Tang, 1996] G. Jin and D. Tang, 'Uncertainties of Differential Phase Estimation Associated with Interferometric Sonars', IEEE Journal Of Oceanic Engineering, Vol. 21, No 1, January 1996.
- [Lurton, 1998] Xavier Lurton, 'Precision Analysis of Bathymétrie measurements using Phase Difference' OCEANS98
- [Urick, 1983] Urick, 'Principles of Underwater Sound', 1983 Ed McGraw-Hill
- [Middleton] D Middleton, 'An Introduction to Statistical Communication Theory', IEEE Press

Extraction d'une réalité tridimensionnelle du fond marin à partir de sonar interférométrique

[Masnadi, 1992] M. Masnadi, 'Differential Phase Estimation with the SeaMarcII Bathymetric SideScan Sonar System', IEE Journal of Oceanic Engineering vol17 no3 july 1992

Summary

This article relates the assistance to comprehension of underwater scenes thanks to the use of a prototype commercial interferometric sonar. It is a question for the operator sonar of not more visualizing one two-dimensional scene, but thanks to interferometry it's possible to visualize this same scene in a three-dimensional way, which facilitates the search and the classification for objects. This sonar proves to be a tool is well adapted to the exploration of the underwater funds, because it provides a side image sonar of high definition, and at the same time a bathymetric image with a rather close resolution to see identical, which authorizes the transformation of the pixel of the image sonar into voxel without retiming. This passage of information 2d to information 3d allows blow to correct all the defects of representation of the data and thus to facilitate the post treatments. This study presents the general concepts of interferometry and its limitations of operation primarily due to the noise. Indeed, the interferometry which is a method of triangulation of echo, is handicapped by the ambiguity of the interferometric phase, because this triangulation is related to a deadline between two antennas modulo the emitted wavelength. The Group of Studies Under Navy of the Atlantic bought an interferometric sonar and developed a general process to reduce these errors of ambiguity. The principal conclusion of this article relates to the potential application of this sonar and the process associated with the study high resolution, of wrecks, small objects, and pipe-plines. Speed use makes it possible to employ it on great spaces. The quality of the data makes the rebuilding 3d possible for an interactive visualization.