

DESCRIPTION

Procédé de mesure de relief par une antenne à profil de gain connu

5 Contexte technique

L'invention objet du présent document s'inscrit dans le domaine du radar ou du sonar.

L'antenne de réception (*receiving array* en anglais) peut être une antenne de réception synthétique auquel cas on parle de sonar ou radar à ouverture synthétique, ou encore de sonar ou radar à synthèse d'ouverture (*synthetic aperture sonar* en anglais), mais cela
10 peut être aussi une antenne de réception réelle ou antenne naturelle (*real aperture sonar* en anglais).

Les antennes d'émission et de réception (*transmitting and receiving arrays* en anglais) considérées, peuvent être portées sur le flanc par un véhicule en déplacement à distance d'une surface, notamment la surface d'un fond marin (*seafloor* en anglais) dans
15 le cas d'un sonar porté par un véhicule marin ou sous-marin, ou encore la surface terrestre émergée dans le cas d'un radar porté par un véhicule aérien. Il s'agit donc dans ce cas d'antennes à visée latérale (typiquement l'axe central de l'antenne est incliné de 15° environ vers le bas par rapport à l'horizontal) : on parle de sonar latéral (*side scan sonar* en anglais).

20 L'invention vise à fournir un moyen simple permettant d'aider à la détermination de l'altitude relative d'un point du fond par rapport aux antennes pour un point faisant l'objet d'une imagerie dans la région proche du nadir (direction verticale vers le bas) du véhicule.

La localisation des points imagés est communément réalisée par interférométrie. Le
25 principe de l'interférométrie est d'ajouter au moins un récepteur décalé sur le plan vertical par rapport à l'antenne principale. Alors que l'antenne mesure une première distance, le second récepteur, par la mesure d'une seconde distance, permet d'accéder à une différence de phase qui est, à un nombre entier de longueurs d'onde près, lié à la localisation du point imagé. Le nombre entier de longueurs d'ondes, initialement inconnu,
30 est déterminé par la méthode dite du vernier (*Vernier method* en anglais). Mais cette méthode reste difficile à appliquer à proximité du nadir du véhicule et même dans un large cône autour du nadir.

La présente invention cherche par conséquent à améliorer la détermination du relief du fond dans la zone du nadir, en utilisant le fait que le gain d'antenne, compté pour l'émission et la réception, présente des fluctuations produisant un motif de franges dans l'image reçue avec typiquement une image qui est « sombre » là où le gain est faible et
5 « lumineuse » là où le gain est important.

En général on cherche à réduire ces fluctuations afin d'obtenir une image de gain uniforme. Cela peut être réalisé par différents artifices comme l'optimisation des lobes d'antenne ou un calcul de gain adaptatif.

Il est proposé néanmoins d'utiliser ces variations indésirables pour remonter à la
10 différence d'altitude relative entre le fond et le véhicule en appréciant que la localisation des franges est fonction de la direction des extrema locaux du lobe d'antenne et de cette altitude relative entre le fond et le véhicule qu'on cherche à déterminer. Le suivi de ces franges permet ainsi de déterminer une estimation du relief du fond qui peut servir telle quelle, ou éventuellement être impliquée dans un processus ultérieur ou complémentaire
15 d'interférométrie.

L'invention peut être utilisée soit en amont de la formation d'image synthétique, soit en aval, afin dans ce cas de suppléer à la détermination de la bathymétrie par interférométrie.

En matière de sonar, la connaissance de la différence d'altitude relative fond-véhicule
20 aide également à déterminer le relief du fond, ce qui permet de construire une carte bathymétrique du fond par prise en compte de la profondeur du véhicule emportant le sonar, connue par ailleurs, et compensation des effets de marée.

La détermination précise de la différence d'altitude relative fond-sonar est donc une fonction importante d'un système imageur par sonar et il est important qu'elle fonctionne
25 de manière satisfaisante.

Problème technique et solution apportée

Pour améliorer les solutions existantes, et notamment améliorer la caractérisation des points à proximité du nadir, il est proposé un procédé de caractérisation d'une surface réfléchissante terrestre ou marine objet d'une imagerie par recueil d'échos d'ondes
30 émises vers ladite surface réfléchissante, par exemple par un véhicule se déplaçant à distance de ladite surface réfléchissante et recueillant au cours de son déplacement

- l'écho d'ondes émises par lui vers ladite surface réfléchissante depuis l'un de ses flancs. L'émission et la réception des ondes sont effectuées à l'aide d'un ensemble d'antennes d'émission et de réception, l'ensemble d'antennes disposant d'un profil angulaire de gain dans le plan vertical connu, qui peut être par exemple à un lobe principal et au moins un
- 5 lobe secondaire – *sidelobe* en anglais (et souvent de nombreux lobes secondaires), ledit lobe principal et ledit au moins un lobe secondaire étant alors dirigés vers ladite surface réfléchissante, et les intensités du signal réfléchi en fonction des portées entre l'ensemble d'antennes et la surface réfléchissante étant mesurées par l'ensemble d'antennes aux fins de constituer une image de la surface.
- 10 Le procédé comprend de manière originale une recherche dans les intensités mesurées d'au moins un extremum local (voire dans certains cas global) et, par une identification dudit au moins un extremum à un extremum (local ou global) dudit profil de gain connu de l'ensemble d'antennes (cet extremum du profil de gain peut être un zéro de l'antenne, ou le sommet d'un lobe, mais ce n'est pas nécessaire), une localisation vis-à-vis du
- 15 véhicule, ou du moins vis-à-vis de l'ensemble d'antennes, d'un point de l'image correspondant audit extremum d'intensité mesurée.

Il peut être tenu compte, le cas échéant optionnellement et avantageusement, d'une valeur d'angle de roulis (*roll angle* en anglais) courante ou d'une valeur courante d'altitude du véhicule (ou du moins de l'ensemble d'antennes), ou de ces deux valeurs.

- 20 L'invention est avantageuse notamment en ce qu'elle fournit un moyen de localiser les points de l'image dans les zones proches du nadir ($\gamma > 45^\circ$ typiquement, voir les figures 1 et 2), là où les méthodes interférométriques sont difficilement applicables.

Cette méthode ne nécessite pas d'équipement matériel supplémentaire, par rapport au montage classique.

- 25 La méthode peut alors être utilisée en complément d'une méthode interférométrique, en particulier pour aider à initialiser la différence de phase de référence du signal. La localisation du point correspondant de l'image peut en tout état de cause être faite par fourniture d'une valeur d'angle, par exemple d'angle de site (ou angle d'élévation) vis-à-vis de l'ensemble d'antennes (ou du véhicule), ou d'une valeur de hauteur, comme le
- 30 relief sur la surface réfléchissante.

Selon des caractéristiques avantageuses et optionnelles :

- la recherche peut comprendre la recherche de plusieurs extrema de gain et la création d'une carte de relief de la surface réfléchissante par interpolation entre les points correspondants ;
- 5 - l'antenne d'émission peut avoir été choisie pour que les lobes soient en nombre choisi, un grand nombre étant souvent avantageux, et qui peut être arbitraire on peut choisir un nombre de lobes et donc de franges élevé, (notamment une douzaine ou plus), sur la moitié de l'antenne d'émission du côté de la surface réfléchissante ;
- 10 - la recherche des extrema peut être effectuée sur des données (les intensités mesurées) avant formation de voies (*beamforming* en anglais) mais après contrôle du gain ou sur des données (toujours les intensités) après formation de voies, la formation de voies ayant été faite avant ou après contrôle du gain ;
- 15 - les données (les intensités) peuvent faire l'objet d'un filtrage passe-bas préalable, le long de l'axe des portées, afin d'éliminer les zones sombres dues au relief et non pas au diagramme de gain d'antenne. Ce filtre passe-bas peut être adaptatif (c'est à dire de gabarit différent en fonction de la position dans l'image) – le gabarit peut ainsi être variable ou constant en fonction de la position dans l'image ;
- 20 - l'ensemble d'antennes peut être porté par (fixé à) un véhicule qui se déplace, par exemple sur son flanc, des acquisitions successives étant effectuées par l'ensemble d'antennes, et optionnellement mais avantageusement, un filtrage passe-bas des intensités mesurées est effectué le long de l'axe des numéros d'acquisition préalablement à la recherche d'extremum,
- 25 - l'ensemble d'antennes peut comprendre une antenne synthétique ou une antenne naturelle pour la réception ;
- ladite localisation peut être utilisée dans un processus subséquent de localisation de la surface réfléchissante par interférométrie, comme référence ou pour lever des ambiguïtés ;
- 30 - les ondes peuvent être des ondes acoustiques de sonar, la surface réfléchissante comprenant un fond marin ;
- les ondes peuvent être des ondes électromagnétiques de radar, la surface réfléchissante comprenant une surface terrestre émergée ;
- 35 - l'ensemble d'antennes d'émission et de réception présente dans le diagramme d'émission en site, une pluralité de minima et maxima locaux d'amplitude suffisamment importante pour permettre ladite recherche, mais suffisamment

faible pour ne pas empêcher de percevoir des objets situés dans les zones de faible niveau de gain.

Liste des figures

La figure 1A présente des principes d'interférométrie appliqués au contexte l'antenne à visée latérale.

La figure 1B présente les principes de l'invention.

Les figures 2A et 2B présentent la géométrie des lobes d'antenne, qui est utilisée dans le cadre de l'invention.

La figure 3 présente une image de sonar, mettant en évidence les zones visualisées par les lobes, par opposition aux zones entre les lobes, plus sombres.

La figure 4 présente les gains du processus d'imagerie, en fonction de la distance vis-à-vis du nadir, pour deux profondeurs différentes.

La figure 5 présente une séquence d'étapes mises en œuvre dans un mode de réalisation de l'invention.

Les figures 6 et 7 présentent une géométrie d'antenne d'émission telle que discutée aux fins d'optimisation.

Ces figures sont de simples illustrations, et vont être commentées plus en détail ici.

Description détaillée

[Fig. 1A] En se référant à la Figure 1A, qui est une coupe verticale le long de la trajectoire du sonar suivant un axe horizontal de coordonnées x , on a représenté une première antenne 1 située à l'abscisse $y=0$ et à l'altitude $z=H$ (au-dessus d'une référence d'altitude prise arbitrairement, avec un axe d'altitude orienté vers le haut), ainsi qu'une seconde antenne 2 située à l'abscisse $y=B.\sin(\alpha)$ et $z=H+B.\cos(\alpha)$ et une cible 3 posée sur le fond de l'océan 4 et située à l'abscisse $y=Y$ et à une altitude $z=h$.

Les antennes 1 et 2, pour le propos relatif à la figure 1, sont considérées être des antennes réceptrices.

Pour chaque récepteur, il existe, dans une direction donnée vers le fond de l'océan, une portée r (sur la figure r_1 ou r_2) jusqu'au fond de l'océan 4, qui dépend outre de la hauteur

du récepteur, aussi des variations du relief du fond de l'océan 4, qui n'est pas connue à l'avance.

B est nommé base, ou « *baseline* » et est l'écart entre les deux récepteurs. L'angle α est l'inclinaison de l'antenne par rapport à l'axe vertical 5, et intègre l'angle de roulis. Cet angle est connu, par exemple par utilisation d'une centrale d'attitude.

La différence de marche mesurée entre les deux antennes 1 et 2 – c'est à dire la différence entre d'une part la distance (ou portée) r_1 entre la première antenne 1 et la cible 3 et d'autre part la distance r_2 (là aussi la portée, mais pour la deuxième antenne) entre la deuxième antenne 2 et la cible 3 est :

$$r_2 - r_1 = \sqrt{r_1^2 + B^2 + 2r_1B \cdot \cos(\gamma + \alpha)} - r_1$$

10 où γ est l'angle de la droite reliant la cible et l'antenne 1 compté par rapport à la direction horizontale (cet angle serait l'angle de rasance – *grazing angle* en anglais - c'est-à-dire l'angle entre la tangente au fond et la droite reliant la cible et l'antenne 1, si le fond était horizontal, ou si la tangente au fond à la cible était horizontale – il est défini au centre de l'ensemble d'antennes émettrices et réceptrices, entre la direction horizontale et la direction du point visualisé qui renvoie l'onde réfléchi), qui est la grandeur à déterminer, car elle permet (connaissant α , B , H , r_1 , r_2), de déterminer h :

$$h = H - r_1 \sin \gamma$$

La mesure n'est néanmoins pas directement $r_2 - r_1$ mais une phase ϕ , proportionnelle à $2\pi(r_2 - r_1)/\lambda$ modulo 2π où λ est la longueur d'onde de la fréquence porteuse du sonar ou radar :

$$\frac{2\pi}{\lambda}(r_2 - r_1) = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{r_1^2 + B^2 + 2r_1B \cdot \cos(\gamma + \alpha)} - r_1 \right) = \phi + 2\pi N, N \in \mathbb{N}$$

20 ...avec N inconnu. Donc, plusieurs angles γ sont solutions de l'équation précédente, en effet :

$$\gamma = \arccos \left(\frac{\left(r_1 + \frac{\lambda \phi}{2\pi} + N\lambda \right)^2 - r_1^2 - B^2}{2r_1 \cdot B} \right) - \alpha$$

Une seule valeur $N = N_0$ de nombre de cycles est la bonne. La solution généralement retenue pour trouver cette valeur N_0 de N est le déroulage de phase (*phase unwrapping*)

ou *phase unrolling*). On suppose qu'on observe une phase ϕ_1 pour un premier point, et qu'on connaît la valeur de N_1 correcte pour ce point. Alors, si on observe la phase ϕ_2 d'un point voisin du premier, telle que on sait avec assurance que la différence de phase $\phi_2 - \phi_1$ est telle que $-\pi < \phi_2 - \phi_1 < \pi$, alors il est immédiat de trouver la valeur N_2 du point
5 courant à partir de celle du premier point. Il est alors possible de propager la valeur du nombre entier de cycles de proche en proche. En pratique, on travaille sur une image, donc un point observé a jusqu'à huit voisins, ce qui permet de contraindre le déroulage de phase avec différentes approches comme les champs de Markov ou la théorie des graphes.

10 Qui plus est, on peut utiliser plusieurs bases interférométriques pour déterminer le nombre de cycles. Ainsi on utilise K antennes réceptrices superposées les unes sur les autres, K étant supérieur au nombre 2 représenté sur la figure 1. On a alors $K-1$ mesures de phase. La diversité des mesures fournit un système d'équations permettant de contraindre les nombres de cycles inconnus et de fournir des hypothèses permettant
15 d'éliminer des valeurs aberrantes. On reproduit essentiellement $K-1$ fois le processus de déroulage de phase, en conservant les solutions qui sont correctes simultanément pour les $K-1$ équations ainsi obtenues.

On peut aussi utiliser une diversité fréquentielle. S'il est possible, même pour une base de $K=2$ récepteurs, comme sur la figure 1, d'avoir plusieurs mesures de phase
20 différentes (pour L longueurs d'ondes différentes λ_1 à λ_L), on obtient également L hypothèses de phase permettant de contraindre le déroulage de phase. Cette diversité de phase s'obtient en émettant rapidement un signal de bande large. On cherche à prendre λ_1 et λ_2 premiers entre eux (l'un n'est pas proche d'un multiple entier de l'autre), afin que la distance minimale à laquelle les phases sont identiques soit la plus grande
25 possible – il s'agit alors du produit $\lambda_1 \times \lambda_2$. On reproduit alors le principe du vernier (*vernier phase unwrapping* ou déroulage de phase de Vernier).

Une limitation de la méthode du déroulage de phase est qu'il est important de bien initialiser la méthode avec une valeur correcte. Il faut également que les variations de phase soient spatialement suffisamment lentes devant le pas d'échantillonnage spatial
30 afin que le déroulage de phase puisse se réaliser correctement (le pas d'échantillonnage spatial doit être plus petit que la longueur d'onde). Enfin, il faut que la phase ne soit pas trop bruitée.

Ces hypothèses ne sont pas forcément réalisées, en particulier quand l'observation est

proche du nadir 5, à savoir pour $\gamma = 90^\circ$, et dans une région où l'angle γ vaut de 45° à 90° , environ. Pour ces raisons, la détermination de l'angle γ n'est pas robuste dans ces régions.

[Fig. 1B] En référence à la figure 1B, dont la partie inférieure constitue une coupe
 5 verticale, on a représenté des éléments en relation avec une unique antenne 1E portée
 par un véhicule V (vu sur la figure de l'arrière). L'antenne 1E est considérée être une
 antenne en émission, sachant qu'une antenne en réception est placée ou plusieurs
 antennes en réception sont placées à proximité immédiate de l'antenne 1E, par exemple
 de part et d'autre – on considère qu'elles sont localisées. L'ensemble d'antenne émet et
 10 reçoit avec une large ouverture angulaire, mais le diagramme de gain angulaire n'est pas
 constant, ce qui va être exploité. Le fond de l'océan 4 réfléchit les ondes émises et les
 temps de parcours permettent de déterminer les distances r . Le sonar dispose donc de
 valeurs d'intensité de signal réfléchi en fonction de valeurs de distance r .

La partie supérieure de la figure 1B présente la courbe qui montre l'amplitude mesurée
 15 A du signal réfléchi, reçu sur une voie, en fonction de la distance r . La partie inférieure
 de la figure montre des profils de fonds alternatifs 4A, 4B, 4C, 4D, en pointillés, qu'il est
 nécessaire d'exclure pour identifier le vrai fond de l'océan 4, représenté quant à lui en
 trait plein. L'angle γ est estimé par comptage des franges dans l'image reçue par le
 sonar. Il définit la direction d'un minimum du diagramme d'antenne par rapport par
 20 exemple à l'horizontale. Dans la courbe de la partie supérieure, l'amplitude mesurée A
 possède des minima, correspondant aux franges sombres de l'image (faible intensité, du
 moins avant traitement de l'image), et aux minima du diagramme angulaire d'antenne, ce
 qui va être mis à profit. En identifiant, dans cette courbe d'amplitude mesurée, une
 valeur A_0 qui est minimum (local, ou éventuellement global) de A, qui est observé pour
 25 une portée r_0 , on en déduit la distance entre le sonar et le vrai fond de l'océan 4, et par
 conséquent l'altitude (la profondeur) du fond dans la direction de l'angle γ qui correspond
 au minimum de gain local dans le diagramme angulaire de gain. L'angle γ étant ainsi
 déterminé, on calcule aisément la profondeur, par un calcul de la différence de hauteur
 $\Delta h = r_0 \cdot \sin \gamma$.

30 A l'inverse les fonds alternatifs 4A, 4B, 4C, 4D donnent des valeurs de portée r_A , r_B , r_C et
 r_D qui se traduisent sur la courbe d'amplitude A par des valeurs élevées, correspondant
 à des zones claires de l'image. Ils sont écartés.

[Fig. 2A] En référence à la figure 2A, qui est à nouveau une coupe verticale, on a
 représenté des éléments en relation avec une unique antenne 1E, qui est considérée

être une antenne en émission, sachant qu'une antenne en réception est placée ou plusieurs antennes en réception sont placées à proximité immédiate de l'antenne 1E, par exemple de part et d'autre. Le diagramme de gain représenté sur la figure correspondant à la somme (en dB) du diagramme d'émission et de réception. Cependant, dans un mode de réalisation, c'est l'antenne d'émission, par sa conception, qui crée de nombreux lobes ; l'antenne de réception en crée moins.

La figure représente pour simplifier le cas d'une antenne d'émission non courbe dans le plan vertical, c'est-à-dire plate, avec un diagramme d'émission typiquement en sinus cardinal. Dans un mode de réalisation la forme peut être arbitrairement différente afin d'augmenter le nombre de lobes.

On note $G_e(\theta)$ le gain de l'antenne en émission (en décibels dB) et $G_r(\theta')$ le gain de l'antenne en réception (toujours en dB) avec θ l'angle de site compté par rapport à l'axe principal 6 de l'antenne 1E et avec θ' l'angle de site compté par rapport à l'axe principal 6 de l'antenne de réception; en considérant que $\theta \approx \theta'$, l'angle θ' étant alors omis de la figure 2A, pour simplifier, on peut considérer le gain total (en dB) :

$$G(\theta) = G_e(\theta) + G_r(\theta)$$

La géométrie des antennes en émission et réception est telle que la fonction $G(\theta)$ présente un maximum en $\theta = 0$, dans le lobe principal 7 de l'antenne d'ouverture $\Delta\theta$, et des maxima secondaires 8 répartis en général à intervalles diminuant progressivement de part et d'autre du lobe principal dans des lobes secondaires. Les lobes sont des angles de sommet l'antenne 1E, dans lesquels le gain croît régulièrement vers un maximum, puis décroît globalement régulièrement (en fait il y a des fluctuations) à partir de ce maximum, la représentation graphique du gain à partir du sommet de l'angle en fonction de la position angulaire formant graphiquement un lobe.

Il y a, visibles sur la figure, trois lobes de part et d'autre du lobe principal, mais il peut y en avoir, plus, voire beaucoup plus. Entre les lobes il existe des régions 9 où le gain tend vers $-\infty$ (en dB) à $\pm \frac{k\Delta\theta}{2}$, $k \in \mathbb{N}$. Les points 10 et 11 du fond marin représentés sur la figure sont respectivement dans la direction $\theta + \frac{\Delta\theta}{2}$ (premier inter-lobe vers le fond marin) et $\theta + \frac{3\Delta\theta}{2}$ (second inter-lobe vers le fond marin). Ils seront commentés plus loin.

Il est possible que le 3^e inter-lobe vers le fond marin soit au-delà du nadir, mais en fonction de l'angle α qui est l'inclinaison de l'antenne par rapport à l'axe vertical 5 ou l'axe horizontal (qui est égal au roulis à une constante additive près et qui est représenté

de deux manières arbitraires différentes sur la figure 2), il peut, ainsi que des inter-lobes suivants, en nombre néanmoins limité, être avant le nadir.

L'image sonar est la fonction f qui à une distance mesurée r et à une abscisse x du sonar le long de sa trajectoire, associe une intensité acoustique I en dB correspondant à l'intégralité des signaux réfléchis par les cibles à distance r du sonar. La fonction f est donc $\mathbb{R}^2 \mapsto \mathbb{R}$ - c'est-à-dire qu'elle associe à deux valeurs réelles une valeur réelle unique.

Sous hypothèse généralement bien vérifiée que pour une abscisse x et une portée r donnée, il n'y a qu'une seule cible qui présente un index - rapport exprimé en décibels de l'énergie renvoyée sur l'énergie incidente (*target strength* en anglais) - significatif par rapport aux autres, alors on peut associer (x, y, r) à une unique valeur de θ , l'angle de site de la cible.

L'intensité mesurée est alors donnée en décibels par l'équation du sonar de la forme :

$$I(x, r) = P + G(\theta) - 40 \log_{10} r + S(x, r, \theta) + K$$

Avec :

P la puissance à l'émission, constante, connue (la valeur n'est cependant pas nécessaire aux calculs développés ici) ;

$G(\theta)$ le gain total (émission et réception), supposé connu au moins à un facteur additif près ne dépendant pas de θ ;

$40 \log_{10} r$ le terme de dilution de la puissance par la distance, calculable, tenant compte des pertes géométriques à l'aller et au retour de l'onde sous hypothèse de célérité constante dans le milieu, connaissant r ;

$S(x, r, \theta)$ l'index de la cible (inconnu) ;

K représente des termes de gains divers (gains de traitement, etc).

[Fig. 2B] En figure 2B, on a représenté un diagramme d'antenne d'émission $G_e(\theta)$ qui est une courbe du gain (en échelle logarithmique, en fonction de l'angle de site θ , typique d'une antenne courbe (décrite plus loin en figures 6 et 7). Pour $\theta = 0^\circ$, le gain est nul, et vaut donc 0 dB, alors que pour des angles θ positifs ou négatifs, le gain devient négatif, et connaît des fluctuations. Il existe des fluctuations d'amplitude de 3 à 5 dB, comme représenté en figure 2B par exemple pour une zone d'angles de site positifs, dans laquelle le gain passe par un minimum local puis par un maximum local qui lui est

supérieur d'un gain noté Δ , de l'ordre de 3 à 5 dB. Dans l'exemple montré, le gain diminue ensuite alors que l'angle de site augmente, mais subit ensuite des fluctuations plus importantes, pouvant être de 10 à 15 dB. Le diagramme présenté est donné à titre purement illustratif et d'autres diagrammes sont possibles. Un effet de la courbure de l'antenne d'émission est en effet de créer des fluctuations aussi petites que quelques décibels. Ces fluctuations bien que faibles sont exploitées dans certains modes de réalisation par l'invention, car elles sont visibles dans l'image sur de nombreuses émissions consécutives, et donc il est possible de les identifier et de les exploiter par un effet d'intégration dans le temps. On utilise donc des minima locaux du diagramme de gain. Ces minima locaux peuvent être compensés dans un traitement a posteriori dans un but d'imagerie mais avant une telle compensation, ils sont utilisés pour faire les calculs de bathymétrie selon l'invention.

[Fig. 3] En relation avec la figure 3, on discute une image formée par le sonar au cours de sa trajectoire, considérée rectiligne, selon l'axe des x , avec sur la figure r la portée en abscisses et x la trajectoire en ordonnées. Le niveau de gris de l'image en un point est, comme indiqué plus haut, l'intensité acoustique I en dB correspondant à aux signaux réfléchis par les cibles à distance r du sonar, les gris clairs étant associés aux intensités élevées, et les gris foncés, aux intensités faibles. En partie gauche de la figure, pour des portées faibles, inférieur à la distance la plus faible entre le système d'antennes et la surface réfléchissante, l'intensité est faible, en l'absence de surface réfléchissante pour les valeurs de portée concernées. Puis, en se déplaçant vers les valeurs de portée plus élevée, une réflexion spéculaire est observée, correspondant à la surface du sol sous-marin au nadir. Pour les valeurs de portée croissantes à partir de cette première valeur, le sol observé est constitué des zones traversées par un déplacement à partir du sol au nadir, dans une direction perpendiculaire à l'axe de déplacement du véhicule ou du moins dans la direction de visée du système d'antennes, qui est en général perpendiculaire au déplacement.

Sous l'une des deux hypothèses suivantes i) que l'amplitude des variations du gain total $G(\theta)$ avec θ soit grande devant celle de l'index des éléments observés $S(x, r, \theta)$, ou ii) que l'étendue spatiale des fortes variations d'index $S(x, r, \theta)$, soit petite devant celle des variations de $G(\theta)$, on peut considérer que l'intensité mesurée s'écrit :

$$I(x, r) \approx G(\theta) + K'(r), \text{ avec } K' \text{ un terme presque uniquement fonction de } r.$$

Cette approximation est particulièrement vraie à proximité du nadir (à gauche sur la

figure). Son implication est que l'image sonar présente des franges sombres 20, 21 (et suivantes, même s'il est possible que seuls deux inter-lobes soient présents avant le nadir auquel cas il n'y a que deux franges sombres), là où $G(\theta)$ est faible, et que ces franges sombres alternent avec des franges claires 23 et suivantes là où $G(\theta)$ est élevé.

- 5 Dans l'exemple des figures 2 et 3, les points 10 et 11 sont respectivement, comme on l'a dit, dans la direction $\theta + \frac{\Delta\theta}{2}$ (premier inter-lobe) et $\theta + \frac{3\Delta\theta}{2}$ (second inter-lobe) et leurs images sonar 100 et 110 sont noires, ce qui traduit ainsi une puissance reçue très faible. A l'inverse le point 3 est proche de la direction du lobe principal et son image 30 apparaît donc dans une région bien illuminée.

- 10 Il y a un lien entre l'angle θ , l'angle γ et la différence de hauteur entre l'antenne 1E et la cible 3. En effet, l'angle de roulis α étant mesuré par une centrale d'attitude, il est équivalent de déterminer l'angle de site θ et de déterminer l'angle γ , car $\gamma = \alpha + \theta$ (cela se voit bien en figure 2). On a aussi :

$$\sin(\gamma) = \frac{H - h}{r} = \frac{\Delta z}{r}$$

- 15 Si on connaît r , θ et α alors la relation $\Delta z = H - h = r \cdot \cos(\alpha - \theta)$ exprime la différence de hauteur entre l'antenne 1E et la cible 3.

- Si on sait, pour une portée donnée r , quel est l'angle de site θ , on en déduit la différence de hauteur $H - h$. Or, spatialement, les alternances de franges sombres 20, 21 et suivantes et de franges claires 23 et suivantes sont très visibles et peuvent être recherchées en faisant varier x , donc en faisant défiler l'image sonar. On peut savoir à
20 quelle frange sombre 20, 21 ou suivante correspond un angle θ correspondant à une région 9 où le gain d'antenne est faible. Il est donc possible de déduire la différence d'altitude $H - h$.

- [Fig. 4] En référence à la figure 4, qui présente l'allure de la fonction de gain (en dB) (en abscisses la portée r en mètres, de 0 jusqu'à 150 m sur la figure, et en ordonnées le gain de -150 dB à -60 dB) pour deux hauteurs différentes $H = 15$ m et $H = 20$ m (donc décalées de 5 m l'une de l'autre), l'invention débute par une détection, dans l'image, des franges sombres 20, 21 et suivantes correspondant aux espaces inter-lobes 90 (les zéros de l'antenne, *antenna nulls* en anglais), ou à un minimal local du diagramme d'antenne. On précise que l'antenne peut être à ouverture rectangulaire ou être une
30 antenne courbe. La figure représente le cas d'une antenne non courbe, plate, avec un diagramme d'émission typiquement en sinus cardinal.

Cette détection peut être effectuée à différents étages du traitement des données sonar, par exemple en utilisant le gain calculé à l'étage du contrôle automatique de gain, ou bien dans l'image à voies formées, ou bien une combinaison des deux. Cette étape permet de fournir, pour chaque position donnée x du sonar le long de sa trajectoire, correspondant à un numéro d'émission (*ping number* en anglais) n , une collection de portées $r_{n,k}$, $1 \leq k \leq p$ où p est le nombre de franges sombres détectées – la figure 4 représente un cas à $p = 5$ franges.

Cette détermination des portées est suivie d'un processus d'étiquetage par les angles des espaces inter-lobes ou des minima locaux. Pour cela, par exemple on commence par identifier la position du lobe principal dans l'image, on identifie le maximum 50 associé dans le diagramme de gain, puis on affecte l'angle $\theta_{n,1} = \theta_0 + \frac{\Delta\theta}{2}$ au minimum 200 le plus proche du maximum 50, l'angle $\theta_{n,2} = \theta_0 + \frac{2\Delta\theta}{2}$ au second minimum 210 le plus proche du maximum 50, et ainsi de suite, de sorte à ce que le k ème espace inter-lobe en partant du lobe principal et en revenant vers les portées faibles, soit affecté à l'angle $\theta_{n,k} = \theta_0 + \frac{k\Delta\theta}{2}$.

L'algorithme de détermination des minima locaux suivi de l'affectation des angles fournit donc une estimation de p couples portée-site, par exemple $(r_{n,k}, \theta_{n,k} = \theta_0 + \frac{k\Delta\theta}{2})$, $1 \leq k \leq p$. Comme, pour $r > H_n$ où H_n est l'altitude de vol du sonar (hauteur vis-à-vis du fond marin au nadir) mesurée par un sondeur à la date d'émission de l'émission n , il est possible de lier les distances r_k aux abscisses y_k du point au sol par la relation :

$$y_{n,k} = \sqrt{r_{n,k}^2 - H_n^2}$$

on dispose donc aussi des couples abscisse-angle de site $(y_{n,k}, \theta_{n,k} = \theta_0 + \frac{k\Delta\theta}{2})$. Comme, par la relation déjà vue plus haut, il est possible de remonter à une différence de hauteur :

$$\Delta z_{n,k} = r_{n,k} \cdot \sin(\alpha_n - \theta_{n,k})$$

où α_n donne l'inclinaison du sonar à l'émission n , on dispose donc des couples abscisse-différence de hauteur $(y_{n,k}, \Delta z_{n,k})$.

Des maxima locaux 51 et suivants peuvent aussi être identifiés pour les lobes secondaires et ils sont associés aux portées $r'_{n,1}$, $r'_{n,2}$ et suivantes.

Ces couples $(y_{n,k}, \Delta z_{n,k})$ peuvent être filtrés afin d'incorporer un *a priori* fourni par la dynamique du véhicule (valeurs de H_n , α_n) ou un *a priori* sur le profil du fond provenant d'un autre capteur, d'une autre implémentation de la méthode présentée à un autre étage du traitement de données, etc, afin d'éliminer des données aberrantes.

- 5 Cette étape de filtrage peut faire appel à des techniques conventionnelles existantes comme le filtrage optimal, le filtre de Kalman, le filtrage ensembliste (*set membership filtering* en anglais), ou encore d'autres.

On peut terminer par la génération d'un profil de hauteur par interpolation (linéaire, *spline*, ou autre) des points de mesure ainsi obtenus, pour $0 \leq y \leq y_{n,1}$:

$$\Delta z(n, y) = \text{interpolation}(y, \{(0, H_n); (y_{n,p}, \Delta z_{n,p}), (y_{n,p-1}, \Delta z_{n,p-1}); \dots; (y_{n,1}, \Delta z_{n,1})\})$$

- 10 On peut de même obtenir une carte des angles γ , ce qui constitue un élément central des objectifs de l'invention :

$$\gamma(n, y) = \arccos \frac{\Delta z(n, y)}{\sqrt{H_n^2 + y^2}}$$

- Alternativement, il est possible de fournir les points $\{(0, H_n); (y_{n,p}, \Delta z_{n,p}), (y_{n,p-1}, \Delta z_{n,p-1}); \dots; (y_{n,1}, \Delta z_{n,1})\}$ bruts comme des références pouvant être utilisées pour initialiser un algorithme de déroulement de phase classique, lequel, contrairement à l'interpolation, complète les données manquantes par des mesures réelles.
- 15

Alternativement et idéalement, il est possible d'hybrider ces deux approches : interpolation et déroulement de la phase contraint par des mesures sur les franges.

- [Fig. 5] En référence à la figure 5, qui présente un schéma-bloc typique de deux approches permettant la détermination du profil $\Delta z(n, y)$, on présente maintenant plusieurs approches, qui peuvent être mises en place de manière autonomes ou complémentaires, et qui sont décrites ci-après. Dans une implémentation aboutie, ces approches sont mises en œuvre séquentiellement afin d'augmenter la performance du procédé, mais il est possible d'utiliser l'une sans l'autre.
- 20

- 25 Une première approche, ou un premier étage, consiste à travailler sur les données issues du contrôle automatique de gain (*automatic gain control*) sur les signaux bruts capteurs, après compression d'impulsion en distance (*pulse compression*) mais avant formation de voies (*beamforming*) en antenne naturelle ou synthétique. Ce contrôle automatique de gain a pour effet d'égaliser les intensités reçues afin de les faire entrer

dans la dynamique du fichier de stockage des données et également de faciliter la visualisation des données par l'opérateur. Le contrôle automatique de gain vise d'éliminer totalement les variations locales d'intensité dans l'image dues aux effets de gain d'antenne et d'atténuation par la distance.

- 5 Une implémentation conventionnelle typique, mais non limitative, de contrôle de gain est la suivante, et est représentée en figure 5. Les détails de l'implémentation ne sont pas essentiels. Soit N_c le nombre de capteurs de l'antenne de réception et $I(i, n, r)$ l'intensité reçue à l'émission n pour la distance r pour le i -ème capteur de l'antenne ($1 \leq i \leq N_c$). Soit $\bar{I}$ l'intensité moyenne – le signal 410 - reçue à la distance r pour tous les capteurs :

$$\bar{I}(n, r) = \frac{\sum_{1 \leq i \leq N_c} \alpha_i I(i, n, r)}{\sum_{1 \leq i \leq N_c} \alpha_i}$$

- 10 avec α_i un paramètre (une valeur réelle proche de 1) permettant de corriger les éventuels défauts de calibration inter-capteurs en intensité. Alors on peut estimer une fonction $f(n, r)$ obtenue par convolution sur l'axe distance de $\bar{I}(n, r)$ avec une fonction $B(r, H_n)$ de réponse impulsionnelle typiquement rectangulaire, dont la longueur typique $l(r)$ sur l'axe distance peut varier (ou non) en fonction de r selon les contraintes
15 spécifiques au domaine d'application du sonar (en particulier de l'altitude H_n de vol du sonar à la n -ième émission), afin de réaliser un filtrage passe-bas 420 (un filtrage passe bas sur l'axe des distances r), le résultat de ce filtrage 420 étant $f(n, r)$:

$$f(n, r) = \bar{I}(n, r) \star B(r, H)$$

- L'implémentation exacte de ce filtre $B(r, H)$ est non essentielle, mais il est désirable que le support spatial de ce filtre soit tel que sont lissées les variations de longueur spatiale
20 typique petites devant celles des franges (la largeur des inter-lobes, évaluée approximativement) des lobes antenne d'émission-réception. A partir de $f(n, r)$, on peut également estimer une seconde fonction $g(n, r)$ – après le filtrage 420, il s'agit d'un deuxième filtrage 430, à savoir un filtrage passe bas $g(n, r)$ réalisé sur l'axe des numéros d'émission, à l'émission n ; une approche non limitative est par exemple par un
25 filtrage récursif de premier ordre du type :

$$g(1, r) = f(1, r)$$

$$g(n, r) = (1 - \beta)g(n - 1, r) + \beta f(n, r)$$

avec β un paramètre entre 0 et 1. Alors, le gain multiplicatif appliqué aux données du capteur i est $\alpha_i/g(n, r)$ pour les valeurs $r > H$ (et 1, pour les valeurs $r \leq H$), ramenant

(en moyenne) les valeurs observées autour de 1 pour les distances sonar supérieures à l'altitude, donc là où on image le fond de l'océan. Quel que soit le filtre passe-bas utilisé, son critère de conception, est que la réponse impulsionnelle du filtre doit avoir un support le plus long possible, tout en étant petit devant la période spatiale minimale L de variation de la position des franges (20, 21) sur l'axe de déplacement x du véhicule. La valeur de L est prise empiriquement en hypothèse. L'implémentation numérique du filtre fait donc intervenir la vitesse instantanée du véhicule, mesurée par ailleurs, ainsi que Δt la période de répétition des impulsions. Dans le cas particulier d'une implémentation par filtre passe-bas récursif du premier ordre, on a $\beta = \exp(-V\Delta t/L)$.

- 10 On a vu plus haut que, sous l'une des deux hypothèses suivantes i) que l'amplitude des variations du gain total $G(\theta)$ avec θ soit grande devant celle de l'index des éléments observés $S(x, r, \theta)$, ou ii) que l'étendue spatiale des fortes variations d'index $S(x, r, \theta)$, est petite devant celle des variations de $G(\theta)$, on peut affirmer que :

$$\bar{I}(n, r) \approx G(\theta) + K'(r)$$

- 15 Par conception, la fonction $g(n, r)$ a les propriétés suivantes : elle élimine (par effet passe bas) les fortes variations de $S(x, r, \theta)$ de taille petite devant l'étendue spatiale de $G(\theta)$ et elle effectue une intégration locale de l'image sur l'axe des *pings* (*cross-range axis* en anglais); autrement dit, elle augmente le rapport signal à bruit de l'image de $G(\theta)$ par rapport à celle de $S(x, r, \theta)$. Si les hypothèses i) et ii) ne sont pas toujours vraies pour
- 20 $\bar{I}(n, r)$, elles le sont en revanche beaucoup plus souvent pour $g(n, r)$:

$$g(n, r) \approx G(\theta) + K'(r)$$

- Cette image $g(n, r)$ est alors une bonne approximation de $G(\theta) + K'(r)$, et se présente comme une fonction dont la représentation logarithmique présente de nombreuses entailles 90 (*notches* – visibles en figure 4) où le gain tend vers $-\infty$ aux portées tombant
- 25 dans les zones inter-lobes 9 où le gain d'antenne est très faible. L'allure de cette fonction est illustrée à la figure 4 en prenant les valeurs arbitraires $\alpha = 15^\circ$ (valeur typique, mais non limitative, de la somme du roulis, généralement presque nul, et de l'angle de dépointage de l'antenne (*array tilt angle* en anglais) vers le fond marin) et $\Delta \theta = 10^\circ$ (valeurs typique non limitative de l'ouverture du lobe principal). La figure illustre
- 30 également le fait que la distance r où se trouvent les minima 200, 210 est fonction de la topographie du fond : en effet, dans le cas illustré ici, le fond est supposé parfaitement plat, à respectivement 15 et 20 mètres du sonar, et les entailles 90 sont décalées vers les faibles portées si le fond est plus proche.

Par un algorithme de détermination 440 pour la détermination de maxima et minima locaux (Détermination de la portée des minima et maxima locaux de $g(n,r)$), il est possible de déterminer, à l'émission n , la portée $r_{n,k}$ des minima 200, 210 qui correspondent aux points 100, 110 situés aux centres des espaces inter-lobes, ainsi que
 5 la portée $r'_{n,k}$ des maxima 220, 230 qui correspondent aux points situés aux changements de signe de la dérivée des intensités, lobe par lobe. Cet algorithme de détermination 440 constitue une recherche dans les portées mesurées (r) d'au moins un extremum de gain.

Cette détermination des portées $r_{n,k}$ est suivie d'un processus d'étiquetage 450 par les
 10 angles correspondants aux minima et maxima locaux du diagramme d'émission-réception (radiation pattern an anglais), en particulier d'étiquetage des portées $r_{n,k}$ par les angles des espaces inter-lobes $\theta_{n,k}$. Il s'agit de l'identification ou de l'association des extrema locaux d'intensité mesurée (par exemple A_0 en figure 1B) à des extrema locaux du profil angulaire de gain.

Pour cela, on commence par identifier le lobe principal, correspondant au maximum 50 de la fonction gain $g(n,r)$. En supposant par exemple que les espaces inter-lobes sont équidistants d'une valeur $\Delta \theta$, on affecte l'angle $\theta_{n,1} = \theta_0 + \frac{\Delta \theta}{2}$ au minimum 200 le plus proche du maximum 50, l'angle $\theta_{n,2} = \theta_0 + \frac{3\Delta \theta}{2}$ au second minimum 210 le plus proche du maximum 50, et ainsi de suite, de sorte à ce que le k ème espace inter-lobe en partant du lobe principal et en revenant vers les portées faibles, soit affecté à l'angle
 20 $\theta_{n,k} = \theta_0 + \left(k - \frac{1}{2}\right) \Delta \theta$. On fait de même avec les maxima locaux, en affectant l'angle $\theta'_{n,0} = \theta_0$ au premier maximum 50, l'angle $\theta_{n,1} = \theta_0 + \Delta \theta$ au second maximum 51, et ainsi de suite, de sorte à ce que le k ème espace inter-lobe en partant du lobe principal et en revenant vers les portées faibles, soit affecté à l'angle $\theta_{n,k}' = \theta_0 +$
 25 $k\Delta \theta$. Si les espaces inter-lobes ne sont pas équidistants ou approximativement équidistants d'une valeur $\Delta \theta$, le calcul se fait en prenant les valeurs exactes connues et tabulées au préalable.

Pour un profil moins régulier, comme celui présenté en figure 2B, on reconnaît aisément également, les minima et maxima locaux, en procédant par ordre et en les recherchant
 30 les uns après les autres.

Le processus de détermination des minima et maxima locaux suivi de l'affectation des angles qui constitue les étapes 440 et 450 en figure 5, fournit donc une estimation de 2p

couples portée-angle de site par exemple $(r_{n,k}, \theta_{n,k} = \theta_0 + (k + \frac{1}{2}) \Delta \theta), 1 \leq k \leq p$ et $(r_{n,k}, \theta_{n,k}' = \theta_0 + k \Delta \theta), 0 \leq k \leq p - 1$. Comme, pour $r > H_n$ où H_n est l'altitude de vol (référence 452 sur la figure 5, visible aussi en figure 2) du sonar (hauteur au nadir) fournie au comme donnée à l'algorithme mesurée soit par un sondeur, soit par le sonar
 5 lui-même à la date d'émission de l'émission n , il est possible de lier les distances r_k aux abscisses y_k du point au sol par la relation :

$$y_{n,k} = \sqrt{r_{n,k}^2 - H_n^2}$$

on a donc également les couples abscisse-angle de site par exemple $(y_{n,k}, \theta_{n,k} = \theta_0 + \frac{k \Delta \theta}{2})$. Comme, par la relation déjà vue plus haut, il est possible de remonter à une différence de hauteur en utilisant l'information de roulis α_n (référence 451 sur la figure 5, l'angle de roulis étant un élément de l'attitude du véhicule et l'angle α d'inclinaison du récepteur étant aussi visible aussi en figure 2), selon l'expression
 10

$$\Delta z_{n,k} = r_{n,k} \cdot \sin(\alpha_n - \theta_{n,k})$$

où α_n donne l'inclinaison du sonar à l'émission n , on peut finalement effectuer un calcul 460 des couples abscisse-différence de hauteur, ou abscisse élévation $(y_{n,k}, \Delta z_{n,k})$. Il s'agit là d'une localisation vis-à-vis du véhicule des points de l'image correspondant aux extrema locaux (tel A_0) d'intensité.
 15

On effectue une interpolation 470 de type linéaire, *spline*, ou autre, des points de mesure 460 ainsi obtenus :

$$\Delta z(n, y) = \text{interpolation}(y, \{(0, H_n); (y_{n,p}, \Delta z_{n,p}), (y_{n,p-1}, \Delta z_{n,p-1}); \dots; (y_{n,1}, \Delta z_{n,1})\})$$

Il s'agit d'une Interpolation du profil $\Delta z(y)$ à partir des points $y_{n,k}, \Delta z_{n,k}$. On peut terminer par la génération d'un profil 480 de hauteur $\Delta z(n, y)$. Cette sortie peut être
 20 suffisante, en fonction des applications, ou réutilisée en aval.

Dans cette première approche, on a travaillé dans les données brutes avant formation de voies ou en l'absence de formation de voies.

Dans une deuxième approche, on utilise une image à voies formées (l'image obtenue après le processus de formation de voies). Selon que cette image à voies formées est
 25 calculée avant ou après application du contrôle de gain, la méthode est légèrement différente.

Si l'image à voies formées est calculée avant contrôle de gain, l'application du contrôle de gain est selon une procédure similaire à celle décrite ci-dessus en relation avec la première approche, en considérant que $\bar{I}(n,r)$ note ici l'intensité observée à la portée r pour la n -ième voie formée. La génération du profil des hauteurs $\Delta z(n,y)$ suit la même
5 procédure que décrite précédemment à la première approche. Cette solution a l'avantage que la résolution spatiale sur l'axe des déplacements x est plus grande que lors du travail émission à émission de la première approche, d'un facteur pouvant typiquement aller jusqu'à 50 voies par émission, voire plus. Par ailleurs, les données brutes des capteurs présentent un effet de moyennement des intensités reçues sur l'axe
10 des déplacements x , ce qui rend la détection des entailles 90 robuste.

Si, au contraire, l'image à voies formées est calculée après contrôle du gain, la détermination de la position de l'alternance des franges sombres et claires dans l'image prend en compte le fait que le contrôle de gain a pu être paramétré pour les supprimer pour fournir une bonne qualité visuelle de l'image et exploiter les petites variations
15 d'intensité résiduelles qui subsistent, avec une amplitude de l'ordre de ± 1 dB. La détermination de la position des franges dans l'image est possible via différentes techniques de traitement d'image. On note ici $\bar{I}(n,r)$ l'intensité mesurée à la voie n pour la portée r . Ces méthodes de traitement d'image sont par exemple et de manière non limitative les approches suivantes :

20 L'application d'un second étage de contrôle automatique de gain similaire à celui décrit à la première approche, mais paramétré de manière à bien isoler les franges sombres et claires ;

Ou bien, on peut utiliser des méthodes de segmentation de type chaîne de Markov cachées (*hidden Markov chains*), considérant que l'intensité $\bar{I}(n,r)$ peut être de deux
25 classes « pixel d'une frange sombre » et « pixel d'une frange lumineuse » dont on connaît la distribution d'intensité a priori, et la probabilité conditionnelle qu'un pixel d'une voie n soit d'une classe donnée étant donnée la classe des pixels de la voie $n - 1$.

Une fois détectés les *minima* et *maxima* locaux, la génération du profil des hauteurs $\Delta z(y)$ suit la même procédure que décrite précédemment à la première approche.

30 Ainsi, le processus peut inclure successivement, le traitement suivant du signal acoustique reçu moyenné pour chaque émission (*ping*) sur l'ensemble des capteurs, ou, s'il y a eu formation de voie, pour le signal de chaque voie de l'image sonar après formation de voie :

- i) un filtrage passe-bas sur l'axe distance configuré pour lisser les variations de taille inférieure à l'espacement spatial des franges ;
- ii) le résultat du filtrage passe-bas précédent, passant par un filtrage passe-bas sur l'axe des *pings* en utilisant récursivement le résultat de la même étape, pour le *ping* précédent ;
- iii) le résultat des deux filtrages précédents, servant de mesure approximative de l'intersection du diagramme d'émission-réception avec le sol, étant soumis à l'algorithme de détermination la portée des maxima et minima locaux dudit diagramme ;
- iv) les portées estimées à l'étape précédente, ainsi que la connaissance a priori des angles où se situent les maxima et minima, permettant d'étiqueter une collection de couples (portée, angles de site par rapport à l'axe principal d'émission) ;
- v) cette collection de couples (portée, angles de site par rapport à l'axe principal d'émission), associée à la mesure de l'attitude du véhicule au *ping* courant, en particulier le roulis, ainsi que l'altitude du véhicule à la date d'émission du *ping* courant, permettant de localiser les points de l'image par exemple en retrouvant une collection de couples (abscisse au sol de référence, différence de hauteur sol-véhicule de référence), où l'abscisse au sol est selon l'axe transversal du véhicule, parallèlement au sol ;
- vi) cette collection de couples (abscisse au sol de référence, différence de hauteur sol-véhicule de référence) servant ensuite de support pour une interpolation par exemple d'une fonction « différence de hauteur sol-véhicule en fonction de l'abscisse au sol ».

On peut aussi effectuer une combinaison de l'estimation par lobes d'antenne développée ici avec les mesures interférométriques connues par ailleurs.

Les profils 480 de la première approche ou de la seconde approche sont utilisés pour initialiser et contraindre un algorithme de déroulement de phase utilisant des mesures interférométriques. Par exemple, l'algorithme peut dérouler la phase en choisissant, en cas d'ambiguïté de phase, l'altitude correspondant au mieux à celle estimée dans le profil 480. L'estimée de l'élévation locale du sol relative à l'antenne sonar ou radar obtenue en se fondant comme enseigné ci-dessus sur la connaissance du diagramme angulaire du groupe d'antenne, peut ainsi servir de référence pour un algorithme d'estimation de l'élévation locale du sol par interférométrie utilisant le déroulement de la phase (méthode du vernier ou ses dérivés), en levant les ambiguïtés de phase par le choix de la phase donnant l'élévation la plus proche de celle estimée par le procédé proposé ici.

[Fig. 6] En référence à la figure 6 qui est une vue de trois-quarts, et également à la figure 7 qui est une vue en coupe, une conception mécanique optimisée de l'antenne d'émission permettant de forger le diagramme d'émission et donc, la position des lobes d'antenne peut aussi être utilisée.

- 5 [Fig. 7] La forme de l'antenne d'émission peut influencer sur la forme des lobes d'antenne et sur l'alternance des franges lumineuses et sombres dans l'image.

Il est possible de coupler l'utilisation de la méthode de détermination de la position des franges dans l'image, à une conception délibérée de l'antenne, afin de maximiser la présence et la visibilité de ces franges.

- 10 Si on considère l'antenne 300 comme une forme tridimensionnelle résultant d'une extrusion, sur une longueur L dans l'axe longitudinal, d'une pièce 301, la surface de la pièce 301 doit être optimisée, en particulier le côté 302 de cette surface, qui, après extrusion, forme la face d'émission 305.

Le rayon de courbure local 304 en un point 303 du côté 302 vient immédiatement influencer

- 15 le diagramme d'émission en angle de site de l'antenne.

L'antenne est alors conçue par optimisation multi-critères, afin d'optimiser les facteurs suivants :

- La position, la largeur et l'amplitude des lobes principaux et secondaires
- La position angulaire des minima locaux entre les lobes
- 20 - Les rayons de courbure locaux 304, qui ne peuvent pas passer sous une valeur minimale dépendant du procédé de fabrication de l'antenne.

La forme de l'antenne d'émission est donc, dans ces modes de réalisation, soumise à un procédé d'optimisation multi-critères afin d'optimiser sa forme, essentiellement sur le plan transverse, afin d'optimiser la position des minima et maxima locaux sur la base des

25 critères suivants : multiplicité desdits minima et maxima, amplitude relative des minima et maxima, rayon de courbure de la face d'émission de l'antenne dans le plan transversal.

- Dans ce mode de réalisation, le lobe principal est optimisé pour être le plus large possible en site, avec un gain globalement uniforme, mais présentant de légères variations de l'ordre de quelques décibels. Ces légères variations, notées Δ à la figure 2B, sont des artefacts de la conception de l'antenne lors du procédé de l'optimisation multi-critères, artefacts utilisés avantageusement pour l'invention. En effet, ces légères
- 30

variations sont trop faibles pour affecter le bilan de liaison de manière très nocive (il est toujours possible d'imager une région au sol avec un bilan énergétique suffisant pour y discerner la scène) mais ces variations locales de gain provoquent sur l'image l'apparition de franges sombres qui, par rapport à l'invention, ont le même effet que

5 l'alternance des minima de gains causés par des espaces interlobes francs (éléments 90 de la figure 4) où le gain tend vers moins l'infini, comme l'on observerait avec une antenne plane, où le diagramme de gain en site est typiquement en sinus cardinal au carré. Bien que la variation de gain soit plus faible (quelques décibels au lieu de plusieurs dizaines, pouvant être assimilés à une variation infinie), cette variation est,

10 manière cruciale pour l'invention, suffisante pour être détectable par l'une, l'autre ou les deux approches de filtrage de l'image (blocs 420, 430 et 440 de la figure 5), notamment par l'effet d'intégration causé par le filtrage passe-bas sur l'axe des *pings* (bloc 430).

L'antenne de réception peut également être conçue de manière à optimiser la forme des lobes d'antenne pour son fonctionnement dans le cadre de l'invention mais, dans un

15 mode de réalisation avantageux, c'est uniquement l'antenne d'émission qui est courbée et qui provoque donc le plus de fluctuations dans le lobe d'émission. L'antenne de réception a un gain plus lisse dans la zone de travail et son effet se fait peu sentir, mais dans une variante, l'antenne de réception est taillée aussi différemment pour amplifier les effets.

20 L'invention est appliquée à l'amélioration de la robustesse de la fonction altimétrie et bathymétrie d'un drone sous-marin, pour des fonctions d'évaluation rapides de l'environnement (REA : *rapid environment assessment*) ou pour une application dédiée à la bathymétrie et la cartographie. Elle est également appliquée à la possibilité de concevoir une micro-antenne latérale donnant, par une conception spécifique de

25 l'antenne d'émission, une fonction de détermination du relief local à bas coût (sans interférométrie, ou avec interférométrie peu résolue avec de petites antennes), cette fonction permettant par exemple un recalage du véhicule par rapport à une carte altimétrique préalablement acquise et enregistrée dans le véhicule (par une méthode de type TERCOM : *TERrain COntour Matching* ou correspondance de relief du terrain, par

30 exemple). L'utilisation de capteurs peu sophistiqués trouve son intérêt pour de petits véhicules fabriqués en grande série comme des meutes de drones ou bien destinés à être perdus comme des drones à usage unique, ou des munitions intelligentes.

L'invention a été présentée avec un sonar latéral ou une antenne à visée latérale, sur un véhicule en mouvement, mais elle s'applique aussi au cas d'une antenne immobile, avec par exemple une formation de voies en azimuth.

5 L'invention s'utilise alors en représentant l'image sonar au point fixe en représentation B-scan : l'axe horizontal est l'axe des distances et l'axe vertical est l'axe des azimuths: $x=r$, $y=\text{azimut}$. L'axe y est alors appelé l'axe azimuthal. On retrouve la représentation de la géométrie du sonar latéral.

En représentation B-scan les opérations restent les mêmes, et la détermination de la bathymétrie du fond se fait ensuite par une adaptation des équations de reprojection.

REVENDECATIONS

1. Procédé de caractérisation d'une surface terrestre ou marine réfléchissante (4) objet d'une imagerie par recueil d'échos d'ondes émises vers ladite surface réfléchissante (4),
5 l'émission et la réception des ondes étant effectuées à l'aide d'un ensemble d'antennes d'émission (1E) et de réception (1, 2), l'ensemble d'antennes disposant d'un profil angulaire de gain dans le plan vertical qui est connu, des intensités (410) en fonction des portées (r) entre l'ensemble d'antennes (1E, 1, 2) et la surface réfléchissante (4) étant mesurées par l'ensemble d'antennes (1E, 1, 2) aux fins de constituer une image de la
10 surface, le procédé étant **caractérisé en ce qu'il** comprend une recherche (440) dans les intensités (410) mesurées d'au moins un extremum local (A_0) et, par une identification (450) dudit au moins un extremum local (A_0) à un extremum local dudit profil angulaire de gain, une localisation (460) vis-à-vis de l'ensemble d'antennes au moins d'un point de l'image correspondant audit extremum local (A_0) d'intensité mesuré,
15 la localisation dudit point correspondant de l'image étant faite par fourniture d'une valeur d'angle de site, ou d'une valeur de hauteur.
2. Procédé de caractérisation d'une surface réfléchissante (4) selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'ensemble d'antennes (1E) est porté sur son flanc par un véhicule (V) qui se déplace, des acquisitions successives étant effectuées par l'ensemble
20 d'antennes.
3. Procédé de caractérisation d'une surface réfléchissante (4) selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que la recherche (440) comprend la recherche de plusieurs extrema d'intensité, et le procédé comprend leur identification à plusieurs extrema locaux du profil angulaire de gain et la création (470) d'une carte de
25 relief (480) de la surface réfléchissante (4) par interpolation.
4. Procédé de caractérisation d'une surface réfléchissante (4) selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que la recherche (440) d'au moins un extremum est effectuée sur des intensités mesurées avant formation de voies mais après contrôle du gain ou sur des intensités mesurées après formation de voies, la
30 formation de voies ayant été faite avant ou après contrôle du gain.
5. Procédé de caractérisation d'une surface réfléchissante (4) selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que les intensités mesurées font l'objet d'un filtrage passe-bas (420), préalable à ladite recherche (440), le long de l'axe desdites

portées, avec un gabarit variable ou constant en fonction de la position dans l'image.

6. Procédé de caractérisation d'une surface réfléchissante (4) selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que l'ensemble d'antennes (1E, 1, 2) comprend, pour la réception, une antenne synthétique ou une antenne naturelle.

5 7. Procédé de caractérisation d'une surface réfléchissante (4) selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que ladite localisation est utilisée dans un processus subséquent de localisation de la surface réfléchissante (4) par interférométrie, comme référence ou pour lever des ambiguïtés.

10 8. Procédé de caractérisation d'une surface réfléchissante (4) selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que les ondes sont des ondes acoustiques de sonar, la surface réfléchissante (4) comprenant un fond marin, ou les ondes sont des ondes électromagnétiques de radar, la surface réfléchissante (4) comprenant une surface terrestre émergée.

15 9. Procédé de caractérisation d'une surface réfléchissante (4) selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que la localisation est faite compte tenu d'une valeur courante (451) d'angle de roulis de l'ensemble d'antennes, ou d'une valeur courante (452) d'altitude de l'ensemble d'antennes, ou des deux.

20 10. Procédé de caractérisation d'une surface réfléchissante (4) selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que l'ensemble d'antennes d'émission (1E) et de réception (1,2) présente dans le diagramme d'émission en site, une pluralité de minima et maxima locaux d'amplitude suffisamment importante pour permettre ladite recherche (440), mais suffisamment faible pour ne pas empêcher de percevoir des objets (10) situés dans les zones de faible niveau de gain (20).