

CRITÈRES DE PERFORMANCE POUR UN SONAR À ANTENNE SYNTHÉTIQUE

D. BILLON, F. LE CLERC, L. HUÉ

Thomson Sintra Activités Sous-Marines
Route de Sainte Anne du Portzic
29601 Brest Cédex

RÉSUMÉ

On définit deux critères de performance pour un sonar à antenne synthétique. L'un concerne la détection, l'autre l'imagerie. On montre à partir de ces critères que l'élargissement de la bande spectrale ne permet pas d'augmenter la vitesse du porteur.

1. INTRODUCTION

Alors que les radars à antenne synthétique sont une réalité commerciale, le sonar à antenne synthétique n'en est aujourd'hui qu'au début du stade expérimental. Deux difficultés de mise en oeuvre contribuent à expliquer cet état de fait : la mesure de la navigation du porteur et la limitation de sa vitesse de déplacement. La précision de navigation nécessaire semble pouvoir être atteinte avec la technologie existante par des systèmes dont la composante principale est inertielle, au moins dans les cas de difficulté moyenne, c'est-à-dire lorsque le rapport entre la longueur d'onde et la durée d'intégration cohérente, représentatif de la précision de vitesse à atteindre, n'est pas extrême. C'est la durée d'intégration plus longue pour le sonar que pour le radar, du fait de la grande différence des célérités acoustique et électromagnétique - alors que les longueurs d'onde sont comparables - qui explique que le problème de la navigation soit plus difficile dans le domaine sonar.

La faible célérité acoustique est aussi la cause de la limitation de la vitesse du porteur : la réalisation d'une synthèse d'ouverture correcte par le déplacement d'une antenne de taille réduite fixe une valeur maximale au déplacement entre deux émissions, alors que la période d'émission doit en général être supérieure au temps de propagation aller et retour pour la portée désirée. Cette contrainte définit une vitesse maximale au-delà de laquelle, l'antenne synthétique devenant lacunaire, son diagramme de directivité présente des lobes image. L'élargissement de la bande spectrale du sonar a été proposée pour pallier cette limitation [1], car les directions des lobes images dépendent de la fréquence. Toutefois, si l'étalement angulaire ainsi obtenu se traduit bien par une diminution du niveau crête, il ne résorbe pas la perte de contraste liée à l'augmentation de l'intégrale des lobes secondaires [2]. Cet article analyse plus précisément cette limitation au moyen de critères objectifs de performance pour des sonars de détection et d'imagerie. Au paragraphe 2 on rappelle les principales équations du sonar à antenne synthétique, non pas dans le souci de faire un exposé de plus d'un

ABSTRACT

Two performance criteria for a synthetic aperture sonar are defined. The first one is related to detection, the second one to imaging. It is shown from both criteria that broadening the signal spectrum does not allow to increase the platform speed.

principe aujourd'hui bien connu [3,4], mais afin de mettre en évidence les contraintes différentes que doivent satisfaire les antennes physique d'émission et de réception. On définit au paragraphe 3 deux critères de performance, l'un relatif à la détection d'une cible ponctuelle à proximité du fond, l'autre à l'imagerie du fond. Enfin on donne et on commente au paragraphe 4 quelques résultats d'évaluation de ces critères.

2. QUELQUES EQUATIONS DE BASE

Soit φ_M la différence de phase entre deux ondes reçues au point R_1 pour l'une et au point R_2 pour l'autre, après émission avec une même phase respectivement au point E_1 et au point E_2 , et réflexion au point M . On a

$$\varphi_M = \frac{2\pi}{\lambda} (E_1M + MR_1 - E_2M - MR_2) \quad (1)$$

Définissons pareillement $\varphi_{M'}$, la différence des phases quand la réflexion a lieu en un autre point M' , et soit $\delta\varphi_{M',M}$ la différence $\varphi_{M'} - \varphi_M$. Dans le cas de la géométrie de la figure 1, où E_1, R_1, E_2 et R_2 sont sur un axe Oy , MM' est parallèle à Oy , et OM est très grand devant OE_1, OR_1, OE_2, OR_2 et MM' , on a

$$\delta\varphi_{M',M} \approx \frac{2\pi}{\lambda} (y_{E_2} + y_{R_2} - y_{E_1} - y_{R_1}) \frac{y_{M'} - y_M}{\rho} \quad (2)$$

où y_X désigne l'abscisse d'un point X et ρ est la distance des points M et M' à l'axe Oy .

On reconnaît dans l'équation (2) l'expression de la différence des déphasages entre les signaux reçus aux deux points de l'axe Oy d'abscisses $y_{B1} + y_{R1}$ et $y_{E2} + y_{R2}$ quand une onde plane incidente de direction orthogonale à Oy se réfléchit au point M' dans un cas et au point M dans l'autre cas. $\delta\varphi_{M',M}$ détermine le diagramme de directivité au point M' d'un système d'antennes focalisé en M et composé de deux couples (émetteur, récepteur) situés aux points (E_1, R_1) et (E_2, R_2) ; une première émission a lieu en E_1 , l'onde



réfléchi étant reçue et enregistrée en R_1 , puis une deuxième émission a lieu en E_2 et la réception correspondante en R_2 . Donc un système composé de N couples (émetteur, récepteur) situés aux points (E_1, R_1) , (E_2, R_2) , ..., (E_N, R_N) d'un même axe, tel que chaque récepteur ne reçoit que le signal réfléchi causé par l'émission de son émetteur associé, a le même diagramme de directivité lorsqu'il est focalisé en un point M , quelconque mais suffisamment éloigné, que celui d'un système comportant un émetteur unique et N récepteurs dont les abscisses seraient celles des récepteurs du premier système augmentées des abscisses des émetteurs correspondants.

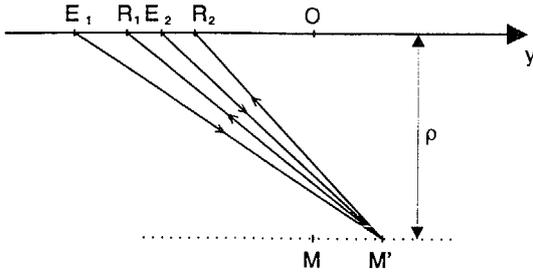


Figure 1

L'antenne synthétique est un exemple d'un tel système. Si le porteur se déplace à la vitesse V le long de l'axe Oy et si T est la période de récurrence, les positions de l'émetteur à N instants successifs d'émission ont un pas constant égal à VT . Par rapport à ces positions, les positions du récepteur aux instants de réception des échos des réflecteurs situés à la distance ρ de la trajectoire du porteur sont décalées dans le sens du mouvement d'un écart approximativement constant égal à $2\rho V/c$, c étant la vitesse de propagation. Nous pouvons donc définir l'antenne classique équivalente, l'ACE, qui a le même diagramme de directivité que l'antenne synthétique : c'est une antenne réceptrice constituée de N sous-ensembles identiques à l'antenne physique de réception qui génère l'antenne synthétique par son déplacement, et répartis le long de la trajectoire du porteur avec un pas égal à la somme des pas des points d'émission et des points de réception, soit $2VT$. Si L_R est la longueur de l'antenne physique, la longueur de l'ACE est donc :

$$L_{ACE} = 2(N-1)VT + L_R. \quad (3)$$

Pour que l'ACE soit non lacunaire, il faut que la longueur L_R de chacun des N sous-ensembles de l'ACE soit au moins égale au pas entre sous-ensembles. Cherchant à minimiser cette longueur, on fixe

$$L_R = 2VT, \quad (4)$$

d'où $L_{ACE} = 2NVT$. Le nombre de sous-ensembles de l'ACE est le nombre de récurrences intégrées de manière cohérente pour focaliser l'antenne synthétique en un point donné. Il dépend de la distance ρ de ce point, de l'ouverture angulaire $\delta\theta_E$ du diagramme d'émission, de la vitesse V du porteur et de la période T de récurrence suivant la relation

$$N = \frac{\rho \cdot \delta\theta_E}{VT} \quad (5)$$

d'où $L_{ACE} = 2\rho \cdot \delta\theta_E$. La résolution angulaire de l'ACE est

$$\delta\theta_{ACE} = \frac{\lambda}{L_{ACE}} = \frac{\lambda}{2\rho \cdot \delta\theta_E}. \quad (6)$$

La résolution longitudinale de l'antenne synthétique à la distance ρ est $\delta y = \rho \cdot \delta\theta_{ACE}$. Pour une antenne d'émission rectiligne de longueur L_E , on a $\delta\theta_E = \lambda/L_E$, expression qui, introduite dans l'équation (6), conduit à la formule bien connue

$$\delta y = \frac{L_E}{2}. \quad (7)$$

La plupart des articles sur l'antenne synthétique supposent $L_E = L_R$. On voit ici que ce choix, qui correspond à une antenne physique unique fonctionnant en émission et en réception, n'est pas optimal puisqu'on a intérêt à avoir une petite antenne d'émission pour gagner en résolution, cf. (7), et une grande antenne de réception pour augmenter la vitesse admissible du porteur, cf. (4).

3. CRITERES DE PERFORMANCE

Soit une antenne synthétique dont l'antenne d'émission est caractérisée par son diagramme de directivité $d_E(\theta, f)$, fonction de l'angle θ et de la fréquence f , et dont l'antenne physique de réception est composée de I capteurs. Nous notons $\delta\varphi(n, i, M', M, f)$ la quantité $\delta\varphi(M', M)$ définie par l'équation (2) quand E_1 et E_2 sont les positions du centre de phase de l'antenne d'émission respectivement aux récurrences 1 et n ($1 \leq n \leq N$), et R_1 et R_2 sont les positions du centre de phase du capteur i ($1 \leq i \leq M$) de l'antenne de réception aux instants de réception correspondants de l'écho réfléchi en M , et pour la fréquence $f = c/\lambda$. La réponse spatiale monochromatique de l'antenne synthétique focalisée en un point M donné s'écrit :

$$F(M', M, f) = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I d_E(\theta(n, M'), f) \cdot a(n, i, f) \cdot \exp(\delta\varphi(n, i, M', M, f)). \quad (8)$$

$\theta(n, M')$ est l'angle d'insonification du point M' à la récurrence n par rapport à l'axe de l'antenne d'émission, et $a(n, i, f)$ est le coefficient de pondération en amplitude appliqué au capteur i à la récurrence n . La réponse spatiale large bande de l'antenne synthétique est définie par :

$$P(M', M) = \frac{\left| \int |S(f)|^2 \frac{F(M', M, f)}{F(M, M, f)} df \right|^2}{\left| \int |S(f)|^2 df \right|^2} \quad (9)$$

où $S(f)$ est le spectre de l'impulsion émise. $|S(f)|^2$ est donc le spectre de l'impulsion en sortie du filtre adapté. $P(M', M)$ est le rapport entre la puissance de l'écho d'une cible ponctuelle située en M' et la puissance de l'écho d'une cible identique située au point de focalisation M , ces puissances étant prises à l'instant de réception du maximum de l'écho venant de M et en sortie du traitement spatial de synthèse d'antenne effectué sur les signaux des I capteurs reçus aux N récurrences et filtrés par le filtre adapté à l'impulsion émise. On a $P(M, M) = 1$ et $0 \leq P(M', M) \leq 1$.

Les performances en détection d'un écho de cible ponctuelle sont déterminées par le contraste de l'écho par rapport à la somme du bruit et de la rétrodiffusion du milieu de propagation. Le bruit étant indépendant d'une récurrence à l'autre, le gain en rapport signal à bruit du traitement de synthèse d'antenne est proportionnel au nombre N de récurrences intégrées. Toutes choses étant égales par ailleurs, le rapport signal à bruit est donc inversement

proportionnel à la vitesse du porteur. La rétrodiffusion dominante est celle du fond marin. Pour un fond homogène, le contraste d'un écho par rapport à la rétrodiffusion du fond en sortie de traitement est donné par l'expression :

$$C_{e/\varepsilon} = \frac{\sigma_e}{\sigma_f \iint P(M', M) dM'} \quad (10)$$

où σ_e est l'index de l'écho, σ_f est le coefficient de rétrodiffusion du fond, et l'intégrale du dénominateur est définie sur la surface du fond. La dépendance de ce contraste par rapport aux cotes de l'antenne synthétique est entièrement exprimée par cette intégrale qui est la section efficace de la fonction $P(M', M)$ sur le fond. Nous définissons la section efficace normalisée σ :

$$\sigma = \frac{\iint P(M', M) dM}{\delta y \cdot \delta \rho} \quad (11)$$

par le rapport de la section efficace calculée sur le plan défini par la trajectoire Oy et le point de focalisation M, et du produit des résolutions longitudinale $\delta y = L_R/2$ et en distance $\delta \rho = c/2B$. σ constitue un critère de performance pour la détection d'une cible ponctuelle proche du fond.

Soit $\gamma(M)$ la réflectivité moyenne du fond marin au point M. Le niveau moyen $\hat{\gamma}(M)$ de l'image du fond fournie par un sonar de réponse spatiale $P(M', M)$ est donné par la relation

$$\hat{\gamma}(M) = \frac{\iint_{\text{fond}} P(M', M) \cdot \gamma(M') dM'}{\iint_{\text{fond}} P(M', M) dM'} \quad (12)$$

quand on néglige le bruit et les échos issus de réflecteurs autres que le fond. La sommation incohérente dans (12) - $\hat{\gamma}(M)$, $P(M', M)$ et $\gamma(M')$ sont des fonctions réelles positives représentant des puissances de signaux - résulte du fait que le champ acoustique réfléchi par le fond peut être modélisé par un signal aléatoire dont la distance de corrélation spatiale est très inférieure à la résolution du sonar. Le champ réfléchi et l'image produite sont des fonctions aléatoires à valeurs complexes $z(M)$, dont $\gamma(M)$ et $\hat{\gamma}(M)$ sont les moments d'ordre 2: $E(|z(M)|^2)$. La relation (12) exprime que le niveau moyen, au sens de cette modélisation stochastique, d'un point de l'image est l'intégrale de la réflectivité moyenne des points du fond qui y contribuent, pondérée par la réponse spatiale du sonar.

La performance d'un sonar d'imagerie du fond doit caractériser la fidélité de l'image dans la restitution de la modulation spatiale de la fonction de réflectivité moyenne $\gamma(M)$ et doit donc être mesurée à partir de $\hat{\gamma}(M)$. La restitution par un sonar latéral des modulations de réflectivité du fond transversales par rapport à sa direction Oy d'avancée dépend essentiellement de sa résolution en distance $c/2B$, alors que l'antenne et le traitement associé déterminent la restitution des modulations parallèles à cet axe. Pour évaluer la performance de l'antenne synthétique, nous considérons la fonction de modulation $\gamma(M)$ définie sur un plan contenant Oy par la relation

$$\gamma(M) = 1 \text{ si } y_M > 0, = 0 \text{ sinon} \quad (13)$$

et le critère de performance associé

$$\delta = \max_{\Delta y > 0} \frac{\hat{\gamma}(M_2) - \hat{\gamma}(M_1)}{\Delta y / \delta y} \sqrt{\frac{\Delta y}{\delta y}} \quad (14)$$

avec $y_{M_2} = -y_{M_1} = \Delta y/2$. Les fonctions $\gamma(M)$ et $\hat{\gamma}(M)$ sont représentées sur la figure 2. Contrairement à la détection, il n'existe pas de critère de performance global communément admis pour l'imagerie sonar. Celui proposé ici résulte du produit de trois facteurs: l'inverse de la largeur $\Delta y/\delta y$ de la zone de transition entre deux zones homogènes de l'image - normalisée par rapport à la résolution afin de rendre le critère δ , comme σ , indépendant de la résolution -, la variation du niveau moyen $\hat{\gamma}(M_2) - \hat{\gamma}(M_1)$ et la racine carrée du nombre $\Delta y/\delta y$ de points indépendants dans cette zone. Le choix de δ est justifié par une conjecture intuitive: l'écart-type de la position estimée d'une frontière transversale entre deux zones homogènes de l'image est proportionnelle à $1/\delta$. A défaut d'admettre le critère (14), le lecteur voudra bien concéder que chacun des trois facteurs précités joue sur la qualité de l'image dans le sens indiqué.

Ainsi définis, σ et δ quantifient une performance relative par rapport à la performance nominale associée aux résolutions δy et $\delta \rho$, en prenant en compte l'intégralité de la réponse de l'antenne synthétique (et notamment ses lobes secondaires).

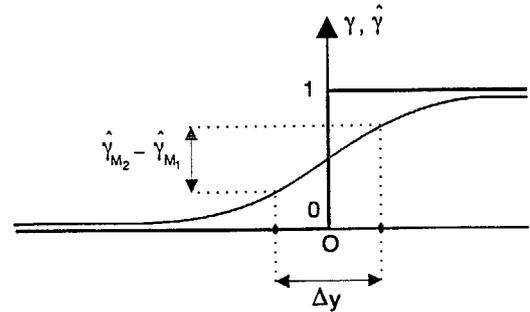


Figure 2

4. RESULTATS

Les deux critères de performance définis au paragraphe précédent ont été évalués dans une configuration représentative d'une application "moyenne fréquence", correspondant aux valeurs suivantes des paramètres sonar: $f_0 = 45$ kHz, $T = 1$ s ($\rho_{\max} = 750$ m), $\rho = 700$ m, $L_R = 1$ m soit $30 \lambda_0$ ($\delta \theta_c = 1,9^\circ$), et pour une émission à spectre rectangulaire de largeur de bande variable entre 2,25 kHz ($B/f_0 = 0,05$) et 45 kHz ($B = f_0$). Pour simplifier, le lobe de directivité de l'antenne d'émission a été assimilé à un créneau:

$$d_E(\theta, f) = 1_{[-\frac{c}{2f \cdot L_R}, \frac{c}{2f \cdot L_R}]}(\theta) \quad (15)$$

Par ailleurs, on a imposé $a(n,i,f) = 1 \forall (n,i,f)$, ce qui revient à modéliser le lobe de l'antenne physique de réception par un sinc de largeur caractéristique λ/L_R . Compte-tenu de la contrainte de non lacunarité (4), le choix $L_R = L_B$ impose sous ces conditions que la vitesse de déplacement du porteur reste inférieure à $v_0 = L_R/2T = 0,5$ m/s = 1 noeud, ce qui en pratique est inacceptable.

Les simulations numériques qui ont été effectuées ont montré que, les résolutions longitudinale $L_R/2$ et en distance $c/2B$ étant fixées, la réponse spatiale $P(M', M)$ d'une antenne synthétique dépend essentiellement des paramètres $v \cdot T/L_R$, L_R/L_B et B/f_0 . De fait, on peut montrer qu'en première approximation cette fonction



s'exprime sous la forme $f(\rho)*g(y)$, où $f(\rho)$ représente l'impulsion comprimée qui ne dépend que de $|S(f)|$, et $g(y)$ la réponse en azimut de l'antenne synthétique, qui est fonction des trois seuls paramètres précités. En conséquence, notre analyse s'est focalisée sur l'évolution des critères de performance en fonction de ces paramètres.

Les résultats obtenus dans l'approche détection sont résumés sur les figures 3a et 3b. La figure 3a ($\sigma(v)$ pour $L_R = L_E$) fait apparaître que σ , nominalement égal à 1 lorsque l'antenne synthétique n'est pas lacunaire, augmente avec la vitesse dès lors que celle-ci dépasse v_0 , et ceci quelle que soit la bande émise. La figure 3b confirme que la contrainte de non lacunarité de l'antenne synthétique porte sur L_R et non sur L_B , et que le choix $L_R > L_B$, qui autorise la formation de plusieurs voies indépendantes en réception à l'intérieur du secteur d'émission, permet de conserver $\sigma=1$ avec $v > v_0$ (cf (4)). Les courbes obtenues sur ces deux figures mettent clairement en évidence que le critère σ est quasiment indépendant de la bande émise, ce qui signifie que l'élargissement de la bande, tout en apportant le gain en performance lié à l'amélioration de la résolution en distance, ne supprime pas la perte de performance engendrée par le sous-échantillonnage spatial de l'antenne synthétique.

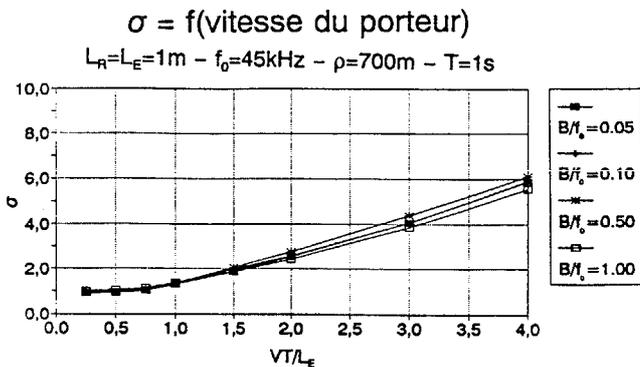


Figure 3a

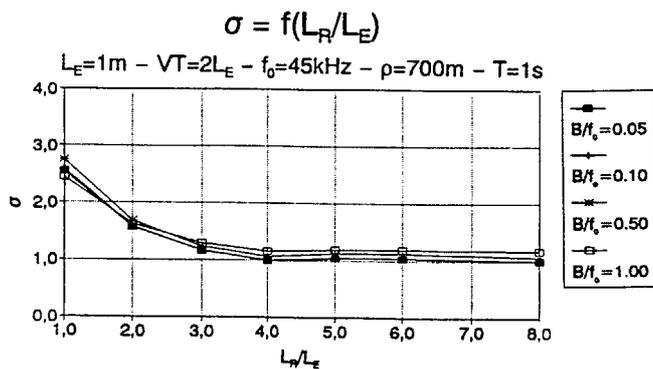


Figure 3b

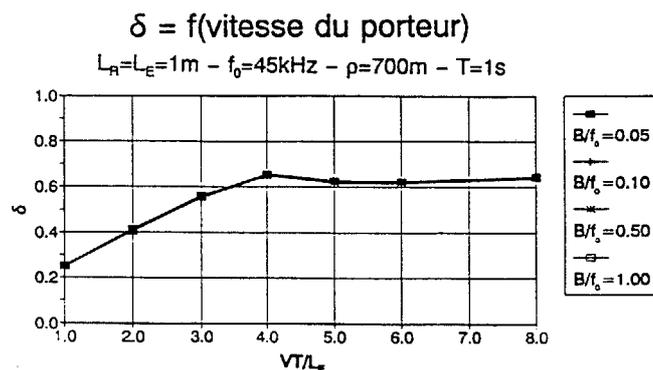


Figure 4a

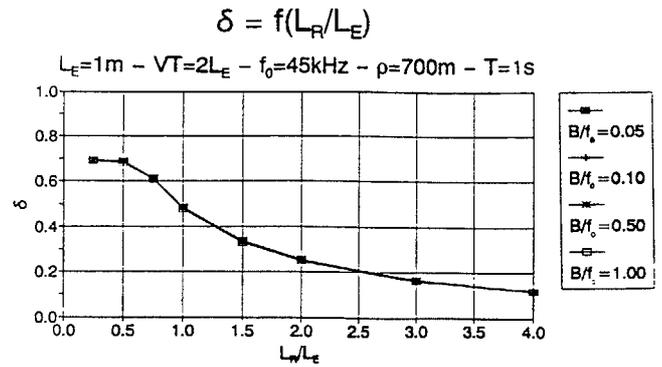


Figure 4b

L'analyse des figures 4a et 4b conduit à des conclusions identiques en ce qui concerne le critère δ relatif à la qualité d'imagerie, dont la valeur nominale ($v \rightarrow 0$) est légèrement supérieure à 0,6. Le maximum de l'expression apparaissant dans (14) est atteint dans tous les cas pour Δy voisin de δy .

5. CONCLUSION

Les performances d'un sonar à antenne synthétique ont été quantifiées au moyen de deux critères, l'un concernant sa capacité à détecter des échos de cibles ponctuelles noyées dans la réverbération de fond, l'autre relatif aux applications d'imagerie du fond marin.

Il apparaît que, à portée et longueur d'antenne physique données, il existe une vitesse maximale du porteur au-delà de laquelle, indépendamment de la largeur de bande, une perte de performance est inévitable. L'augmentation de la vitesse sans perte de performance implique l'utilisation d'une antenne physique longue, ce qui fixe une limite au gain apporté par la solution antenne synthétique relativement à un sonar latéral classique.

Remerciements

Les travaux présentés dans cet article ont été réalisés grâce au soutien de la DRET (contrat n°91.306.16).

Bibliographie

- [1] P. De Heering, "Alternate Schemes in Synthetic Aperture Sonar Processing", IEEE J. Oceanic Eng., vol. OE-9 no 4, pp. 277-280, Oct. 1984.
- [2] M.P. Hayes et P.T. Gough, "Broad-band Synthetic Aperture Sonar", IEEE J. Oceanic Eng., vol. 17 no 1, pp. 80-94, Janv. 1992.
- [3] L.J. Cutrona, "Comparison of sonar system performance achievable using synthetic-aperture techniques with the performance achievable by more conventional means", J. Acoust. Soc. Am., vol. 58 no 2, pp. 336-348, Août 1975.
- [4] K. Tomiyasu, "Tutorial Review of Synthetic-Aperture Radar (SAR) with Applications to Imaging of the Ocean Surface", Proc. IEEE, vol. 66 no 5, Mai 1978.