



**DEUX APPROCHES DE LA LOCALISATION PAR "MATCHED FIELD" :
LA TELEMETRIE SUR TRAJETS MULTIPLES, ET LA LOCALISATION
PAR FILTRAGE DE MODES**

O. FOURCADE, R. FOKA
M. TRAN VAN NHIEU, Y. BLANCHARD

THOMSON SINTRA ASM
1, avenue Aristide Briand, 94117 ARCUEIL CEDEX

RÉSUMÉ

La localisation en distance et immersion d'une source acoustique peut être obtenue par des méthodes fondées sur la modélisation des multi-trajets dans un guide océanique. On analyse les conditions de leur application sur systèmes embarqués dans l'hypothèse d'une modélisation par rayons ("Télémetrie par Trajets Multiples") ou d'une modélisation par modes ("Filtrage de modes sur antenne horizontale").

1. INTRODUCTION

Reposant sur un modèle simplifié d'onde plane, le traitement conventionnel de "formation de voie" ne permet pas la localisation 3D d'une source, qu'il suppose rejetée à l'infini dans un milieu idéal lui-même illimité. Si on envisage un modèle d'onde sphérique (principe des méthodes CFO de télémetrie par Courbure du Front d'Onde), on se limite aussi aux faibles distances, le domaine de la zone de Fresnel, en négligeant encore les phénomènes de propagation.

Aussi un intérêt particulier est apparu ces dernières années pour des méthodes plus générales, connues sous le nom générique de "Matched-Field" (ou d'"Adaptation du Champ"). Elles se fondent sur une modélisation plus réaliste du champ acoustique, par calculs de rayons ou par décomposition modale. C'est la mise en pratique de principes énoncés par H. MERMOZ (1), selon lesquels un modèle enrichi permet a priori l'estimation d'un nombre accru de paramètres. En l'occurrence, on cherche à obtenir ainsi la distance inconnue de la source.

Après un rappel des principes généraux du "Matched-Field" on évoque ici, à travers deux approches ayant donné lieu à des études récentes à THOMSON SINTRA ASM, les conditions de leur application sur des systèmes embarquables.

2. PRINCIPE DES METHODES DE LOCALISATION PAR "ADAPTATION DU CHAMP" OU "MATCHED-FIELD"

Dans la configuration de base (fig.1) une antenne à l'immersion D reçoit simultanément un trajet direct, et deux trajets réfléchis respectivement sur la surface et sur le fond. Si cette antenne est en mesure de restituer correctement les angles d'arrivée de ces trajets, deux seuls rayons (le direct et le réfléchi surface p. ex.) doivent suffire à une mesure de la distance l, donnée par :

ABSTRACT

Range and depth estimation of an acoustic source may be achieved by new techniques using modelisation of the multi path propagation in an oceanic waveguide. Applications to on-board systems are described, both when using rays or modal modelisation techniques, i.e. first the "Multipath Target Localization" method, and second a "Mode Filtering on horizontal antenna" method.

$$l = \frac{2D \cos \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (1)$$

On reviendra en 3 sur ce cas de figure où l'antenne reçoit un nombre réduit d'ondes planes, situation qui se prête bien à une description par rayons. Mais dans des conditions plus complexes de propagation par "petits fonds", les trajets peuvent subir des réflexions nombreuses sur la surface et le fond, et le processus physique devient totalement dominé par ces réflexions multiples. En modélisant le conduit océanique comme un guide d'ondes stratifié, la propagation est rigoureusement décrite par la théorie des modes normaux.

Le problème de localisation doit être alors posé comme un problème de résolution inverse : retrouver, à partir du champ de pression complexe mesuré sur l'antenne, les paramètres caractéristiques de la source (qui incluent sa position). Selon la démarche bien établie, on le résoud en cherchant à maximiser un critère (généralement un estimateur de puissance en sortie de traitement), qui exprime l'accord entre la situation perçue par l'antenne (le vecteur "mesure"), et une situation théorique attendue (le vecteur "modèle"), calculée en supposant le bruiteur situé tour à tour en chaque position de l'espace à explorer. La position qui correspond au maximum de l'estimateur est reconnue comme position de la source. Les performances dépendent de la pertinence du critère choisi, ainsi que de la richesse et du réalisme du modèle appliqué.

Le plus souvent, le vecteur de mesure est constitué directement à partir des N valeurs de pression P_i relevées sur les capteurs, et l'estimateur est obtenu par extension de l'un des estimateurs "conventionnels" (estimateur de BARTLETT, du Maximum d'Entropie, ou du Maximum de Vraisemblance).

En négligeant la contribution de la partie continue du spectre, pour ne considérer que la pression acoustique due aux modes propagatifs, la pression P_i , relevée sur le ième capteur



d'un réseau vertical à l'immersion z_i , pour une source à distance r_s et immersion z_s , s'écrit :

$$P_i(r_s, z_s) = \rho_i \sqrt{\frac{2\pi j}{r_s}} \sum_{m=1}^M \phi_m(z_i) \phi_m(z_s) \frac{e^{-\beta_m r_s}}{\sqrt{k_m}} \exp(jk_m r_s) \quad (2)$$

et un premier traitement (2), issu de l'estimateur de Bartlett, consiste à exprimer l'accord entre les vecteurs mesure P et modèle P_r par une fonction de corrélation linéaire du type :

$$A(r_s, z_s, r'_s, z'_s) = \frac{|\sum_i P(r_s, z_s) \cdot P_r^*(r'_s, z'_s)|^2}{\sum_i |P|^2 \sum_i |P_r|^2} \quad (3)$$

C'est la "fonction d'ambiguïté" du problème, que l'on peut caractériser de la manière suivante :

a- Elle présente des lobes secondaires relativement importants, dont la réjection dépend directement du nombre de modes propagatifs pris en compte (>60 modes pour une réjection de 10 dB !).

b- Les premiers lobes secondaires résultent des interactions entre modes de rangs différents $n \neq m$, et apparaissent à des distances égales à $2 \pi (km - kn)$, appelées "distance d'interférence de modes".

c- Les pertes dans le fond diminuent l'énergie des modes propagatifs et donc la qualité de la fonction d'ambiguïté.

d- Pour exploiter correctement les propriétés d'orthogonalité des modes, le réseau vertical doit s'étendre sur toute la profondeur disponible, et être échantillonné à 2 fois la longueur d'onde du mode d'ordre le plus élevé. Les résultats se dégradent très rapidement dès que le réseau est inférieur à la moitié de la profondeur d'eau.

Ces considérations, plutôt décevantes, sont confirmées par les essais en mer (3), et on voit bien que le traitement classique de corrélation, sauf circonstances très favorables sur des réseaux verticaux de très grande dimension, se heurte à un problème d'ambiguïté fondamentale. Aussi est-ce très naturellement qu'on a proposé très tôt (4) d'y substituer les techniques de CAPON et du Maximum de Vraisemblance, réputées mieux adaptées à de telles situations. On obtient effectivement (5) à la fois une réduction des lobes secondaires et une meilleure résolution du pic principal, avec en contre-partie une moins grande robustesse vis-à-vis d'erreurs de modélisation (sur la profondeur d'eau, le profil de vitesse, l'atténuation, la nature du fond, la cohérence spatiale du bruit...).

3. LA "TELEMETRIE PAR TRAJETS MULTIPLES"

Ceci dit, il y a bien déjà des situations où ces méthodes de localisation sont appliquées, de façon plus ou moins empirique, sur des systèmes à la mer.

Il s'agit de l'exploitation de phénomènes couramment observés, tels que le représente la fig.2. (image "site/temps" d'une interception d'impulsion sonar) : on y distingue l'arrivée en trajet direct de l'I.S., suivie de 2 autres impulsions séparées à la fois en angles de site et en temps d'arrivée, et correspondant à 2 trajets réfléchis. Il est clair que cela doit permettre une estimation de la distance de la source. Dans la pratique, on dispose pour cela d'abaques pré-calculés, utilisés par l'opérateur sonar dans des procédures semi-manuelles.

Plus récemment, on a cherché à automatiser ces fonctions, par une méthode de calcul "inverse", consistant à retracer les rayons "à l'envers" par rétro-propagation à partir des sites mesurés sur l'antenne (fig.3a). Pour tenir compte de l'incertitude de la mesure en site, il s'agit en fait de faisceaux de rayons, et leurs zones d'intersection délimitent les zones de présence possible du bruiteur. Dans les cas favorables, les ambiguïtés peuvent être levées, soit par la prise en compte de plus de deux trajets, soit en utilisant les écarts de temps (s'il s'agit de bruits rayonnés large bande ou d'impulsions sonar).

Mais ceci pose en réalité beaucoup de problèmes délicats : automatisation du choix des rayons pertinents (des situations totalement ambiguës telles que représentées fig.3b peuvent résulter d'un mauvais choix), correction des effets d'appareil de mesure (biais et capture), etc... On s'oriente donc plutôt vers des procédures de résolution directe, en posant à nouveau ce problème d'estimation selon le schéma général des méthodes de Matched-Field, associées à un critère de maximum de vraisemblance. Le modèle utilise cette fois un calcul de propagation par rayons. Le détail de cette méthode "directe" a été décrit en (7). Le tableau ci-dessous rappelle quelques résultats typiques obtenus dans le cas d'une simulation d'antenne de 25 capteurs espacés de $0,4 \lambda$, pour une même source à $f = 2,75$ kHz située tour à tour à 40 km et 60 km (profondeur d'océan : 4500 m).

R (km)	σ_R/R	σ_Z/Z	S/B
40	1.3	35	-12
60	30	330	-21

Ces performances sont atteintes en prenant en compte le trajet direct et le réfléchi fond, ce qui est en fait une situation favorable, mais optimiste à une telle distance : dans la pratique, le réfléchi fond peut être rarement utilisé au-delà de 10 km, après quoi le calcul s'effectue sur le couple trajet direct/réfléchi surface. Bien que ces rayons se trouvent confondus dans un même lobe d'antenne, les capacités de "super-résolution" de l'estimateur permettent une restitution correcte en distance. Ceci est mis en évidence fig.4 (exemple de traitement sur signaux réels, source immergée à $z = 100$ m, $r = 8,6$ km) : le traitement de voie classique ne fait apparaître qu'un seul site estimable (fig.4a), alors que la fonction d'ambiguïté résultant du traitement complet (fig.4b) identifie bien par un minimum marqué la



position de la source (avec toutefois une assez grande incertitude sur l'immersion, théoriquement de 100 m dans cet essai, et une ambiguïté distance de 30 km correspondant à la périodicité des zones de convergence).

4. LA "LOCALISATION PAR FILTRAGE DE MODES" SUR UN ANTENNE HORIZONTALE

Qu'il s'agisse de propagation par modes ou par rayons, le premier problème des systèmes embarqués paraît lié à l'envergure trop faible des antennes verticales. C'est la raison pour laquelle on a proposé plus récemment des applications de Matched-Field sur grandes antennes horizontales, de type flûte.

D'un point de vue pratique, ce choix a le défaut de nécessiter un calcul sur 3D (sur les paramètres r_s , z_s et θ_s), à l'inverse de l'antenne verticale où le calcul est réduit à 2D du fait de la symétrie cylindrique.

Une méthode originale, proposée par SHANG (8), permet d'y remédier en partie. Elle consiste à rechercher l'adaptation du champ non plus sur le vecteur des N mesures de pression, mais sur un vecteur constitué des M amplitudes des modes du guide. Sous l'aspect volume de calcul, ce choix a deux avantages : il ramène de N à M la dimension de l'espace sur lequel s'effectue l'estimation ; et par ailleurs on montre qu'il conduit à une séparation des variables r et z , ce qui permet de remplacer le balayage 2D de l'espace (r_s , z_s) par deux balayages mono-dimensionnels.

Sur l'antenne horizontale, formée de N capteurs séparés d'un intervalle d , la pression acoustique relevée sur le nième capteur et résultant d'une source repérée par ses coordonnées r_s (distance), z_s (immersion), et θ_s (dépointage par rapport au broad-side de l'antenne) s'écrit selon la décomposition modale :

$$P_n(r_s, z_s, \theta_s, z) = S_0 \sqrt{2\pi j} \sum_m [\phi_m(z_s) \phi_m(z)] \sqrt{\frac{2\pi}{k_m r_s}} e^{-\beta_m r_s} \exp(jk_m r_s) \times \exp(jk_m z_s) \cdot \exp[(jk_m - \beta_m) n d \sin \theta_s] \quad (4)$$

et il s'agit maintenant d'identifier (de "filtrer") ces modes à partir des N signaux de pression. Il se trouve que l'expression (4) peut être rapprochée d'une représentation de PRONY, où le signal est modélisé par une somme de M exponentielles d'amplitudes, de phase, de fréquences et d'atténuations arbitraires, sous la forme :

$$P_n = \sum_m b_m z_m^n \quad \text{avec} \quad \begin{cases} b_m = A_m \exp(j \phi_m) \\ z_m = \exp[(\alpha_m + jk_m) d] \end{cases} \quad (5)$$

Ainsi les paramètres de la source peuvent être calculés, par identification de (4) et (5), à partir des b_m et z_m , qui seront eux-même obtenus selon la solution de Prony - à partir des coefficients d'une modélisation AR des mesures de départ P_n .

Le résultat d'une simulation de cette méthode est donné fig.5. Il s'agit d'une flûte de longueur 435 m, échantillonnée par 117 capteurs espacés de $\lambda/4$. Une source est placée à $r_s = 3200$ m, $z_s = 70$ m et $\theta_s = 35^\circ$, dans une profondeur de lame d'eau de 2500 m, en bathy "November". On obtient une position

correcte de la cible en distance, mais l'estimation d'immersion, totalement ambiguë, n'a pas été représentée. De façon plus générale, on a constaté sur l'ensemble des simulations, de bons résultats pour l'estimation du gisement θ_s , à condition de limiter le calcul aux deux premiers modes. Mais les résultats sont beaucoup moins satisfaisants sur les deux autres paramètres.

On peut contourner la difficulté en adoptant une méthode "mixte" : filtrage de modes pour l'estimation de θ_s , puis retour à une méthode de Matched Field conventionnel pour le calcul des deux autres paramètres. Perdant le bénéfice de la séparation des deux variables, il faut alors faire le calcul sur l'ensemble du domaine r_s , z_s .

5. CONCLUSION

Différentes voies d'application du principe de Matched Field à des systèmes embarquables ont été présentées. On est confronté chaque fois à un même problème d'ambiguïtés liées aux contraintes de dimensionnement des antennes, ce qui en général impose des procédures lourdes en charge de calcul - d'exploration systématique de tout l'espace des paramètres à estimer. Il est peu probable que des méthodes de calcul inverse par rétro-propagation puissent changer cet état de fait. Il faudrait sans doute chercher à utiliser une dimension supplémentaire, liée au mouvement de la cible : prise en compte de l'effet doppler, ou évolution vers une trajectographie 3D. Au stade actuel, les procédures semi-manuelles restent les plus sûres.

-
- (1) Henri MERMOZ, "Imagerie, Corrélation, Modèles", Ann. Téléc., 31 n°1-2 (1976), PP. 17-36
 - (2) Homer P. BUCKER, "Use of calculated sound fields and matched-field detection to locate sound sources in shallow water", JASA, vol 59-2 (1976), pp. 368-373
 - (3) Rachel M. HAMSON, Richard M. HEITMEYER, "Environmental and system effects on source localization in shallow water by the matched-field processing of a vertical array", JASA, vol 86-5 (1989), pp. 1959-1959
 - (4) Melvin J. HINICH, "Maximum-Likelihood Signal Processing for a vertical array" JASA, vol 54 (1973), pp. 499-503
 - (5) Richard G. FIZELL, "Application of high resolution processing to range and depth estimation using ambiguity function methods", JASA, vol. 82-2 (1987), pp. 606-613
 - (6) Michael B. PORTER, Ronald L. DICUS, Richard G. FIZELL, "Simulation of matched-field processing in a deep-water Pacific environment", IEEE-JOE, vol OE-12, n° 1, 87, pp. 173-181
 - (7) Hubert BOUCARD, Odile FOURCADE, Dominique THUBERT, "Multipath Target Localization", Proc. of Undersea Defense Technology (UDT 90), LONDRES
 - (8) E.C. SHANG, "Waveguide characterization and source localization in shallow water waveguides using the Prony method", JASA, vol 83, (1988) pp. 103-108

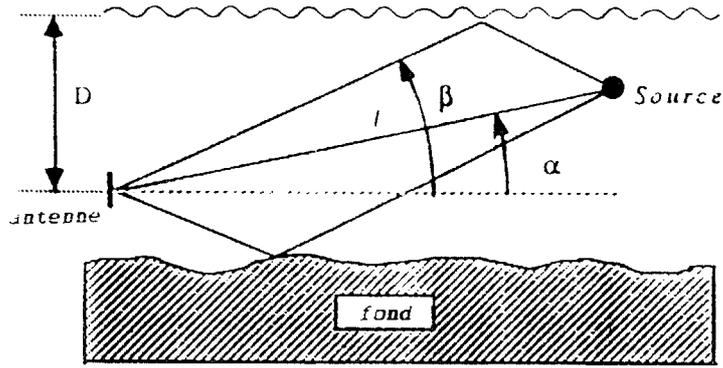


fig 1 TTM - Configuration de base

réurrences

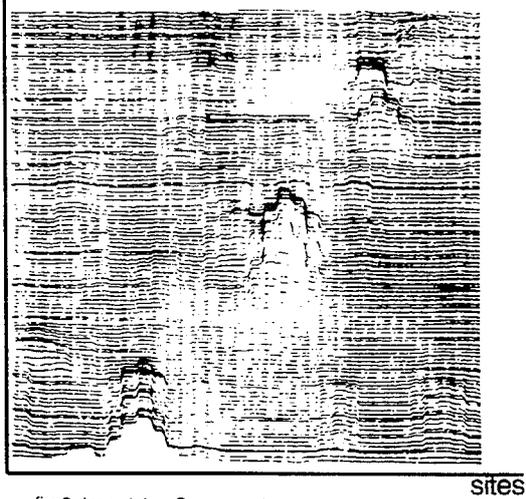
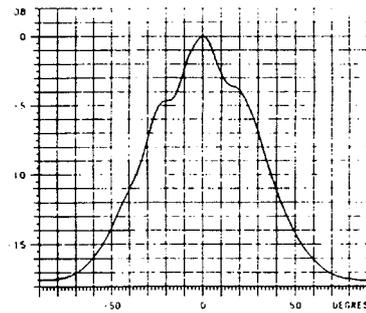


fig 2 Impulsion Sonar, trajets direct et réfléchis
(énergie en sortie de voies site, suite de recurrences)

4 a SORTIES DE VOIES CLASSIQUES



4 b Fonctions d'ambiguïté

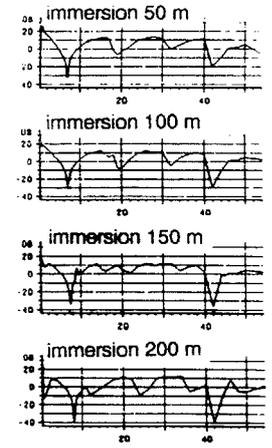


fig 4 TTM sur cible à 8,6 km

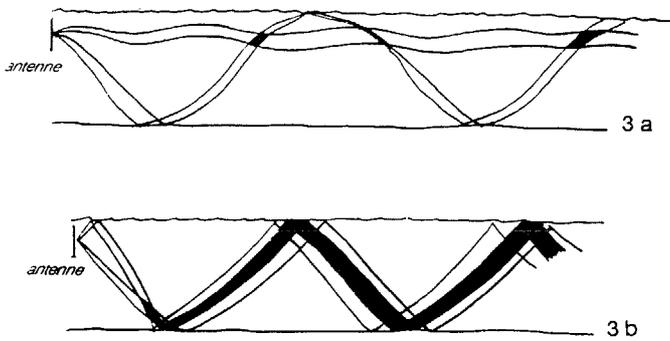


fig 3 Calcul inverse par rétro-propagation de rayons

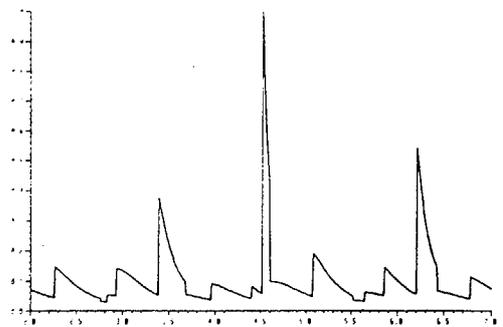


fig 5 Evaluation de distance par filtrage de modes