COLLOQUE NATIONAL SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL
ET SES APPLICATIONS

NICE du 16 au 21 JUIN 75

CALCUL DIRECT DU CHAMP SONORE EFFICACE D'UN SONAR. APPLICATION A L'ETUDE DE LA REVERBERATION

Bernard de RAIGNIAC

Société d'Etudes et Conseils AERO 3, avenue de l'Opéra 75001 PARIS

RESUME

Quand on désire calculer le champ sonore rayonné et la réverbération produite par un sonar, on ne s'attache pas aux fluctuations d'intensité survenant sur des écarts de distances de l'ordre de la longueur d'onde émise. On s'intéresse au champ sonore efficace ou loi d'évolution de la valeur moyenne de l'intensité sonore calculée dans un large volume. Néanmoins l'hypothèse de la conservation de l'énergie dans un faisceau dont la section peut devenir infiniment petite conduit les programmes classiques de tracés de rayons à une représentation ponctuelle du champ. De très nombreux rayons sont alors nécessaires et les résultats ne sont valables que loin des caustiques. Dans ces régions, des raffinements de la théorie des rayons permettent une description précise des phénomènes dont la localisation reste toutefois hasardeuse du fait de la modulation de la direction des rayons par les inhomogénéités du milieu marin et de ses frontières.

Le calcul direct du champ sonore efficace peut être tenté grâce aux hypothèses suivantes :

1. Le faisceau considéré a une ouverture angulaire finie ce qui permet de substituer $\Delta\alpha/\Delta z$ à $d\alpha/dz$ dans la formule d'affaiblissement.
2. Représentation matricielle du plan distance profondeur découpé en domaines rectangulaires égaux. Les contributions énergétiques de chaque faisceau sont sommées dans chaque domaine indépendamment de leur phase.

Un court programme de calcul réalisé selon ces principes a fourni des résultats intéressants tant par petits fonds que par grands fonds.

SUMMARY

When predicting the radiated acoustic field and reverberation levels of a sonar, experimenters are not concerned by intensity fluctuations occuring within paths of the wave length order. They are looking for the spatially averaged field. The assumption of energy conservation within infinitly thin ray bundles, yields discrete points field representations by conventional ray tracing programs. Very large numbers of rays are therefore required and results are valid in caustic free regions only. Ray theory refinements do cope with false singularities in these regions but accurate location of their precise field descriptions are randomly perturbed by inhomogeneities of the medium or its boundaries.

Attempt to direct calculation of the spatially averaged sound field has been done with the following assumptions :

1. Finite vertical aperture bundles allow to substitute $\Delta\alpha/\Delta z$ to $d\alpha/dz$ in the geometrical spreading loss formulation.
2. Matrix representation of the range-depth plane. Intensity contributions of each ray bundles are incoherently added in each cell.

A short program written on these principles yields interesting results for deep and shallow-water cases.

1.- INTRODUCTION

De nombreux modèles numériques : CONGRATS [1], FACT [2], NISSM [3] ... permettent de calculer le champ sonore rayonné par un sonar pour des valeurs données des paramètres du signal et du milieu marin. Ces modèles sont actuellement voisins de la perfection car il est bien peu de caractéristiques du milieu marin dont ils ne puissent convenablement tenir compte. Tous ces modèles postulent au milieu déterministe dont la structure est connue avec toute la précision souhaitable. En fait les paramètres du véritable Océan subissent des fluctuations aléatoires spatiales et temporelles superposées à leurs valeurs moyennes, elles-mêmes variables avec la largeur de la fenêtre d'observation. Si la précision toute rudimentaire des premiers modèles permettait de négliger cet aspect aléatoire du milieu marin, la résolution et la puissance des modèles actuels peuvent entraîner des confusions dans l'interprétation des caractéristiques du champ sonore prédit. En effet ces modèles fournissent les structures fines du champ sonore instantané et non celles plus grossières du champ moyen ou efficace. Un certain nombre de modèles théoriques par CLARKE [4], MELLEN [5] ou SMITH [6] ont abordé certains aspects de ce processus stochastique, néanmoins le "modèle stochastique de propagation" ne semble pas pour demain. Sans prétendre être un modèle stochastique, l'algorithme RAIBAC traite le problème limité du calcul de la valeur moyenne algébrique du champ dans un domaine spatial donné. Ses prédictions peuvent être adaptées aux valeurs moyennes mesurées par l'expérience. Elles se révèlent peu sensibles aux perturbations de "haute fréquence" du profil de célérité en évitant les fausses caustiques et les fausses zones d'ombre. L'effort de calcul enfin est proportionné à l'information désirée.

2.- LA THEORIE CLASSIQUE DES RAYONS

Le facteur perte de propagation L est défini par :

$$I_P = I_0 L$$

avec : I_0 : intensité sonore à la distance de référence de la source,

I_P : intensité sonore au point P .

Le facteur L_ν du $\nu^{ième}$ rayon joignant la source au point P est :

L_ν = $SARD$

S = pertes géométriques (spreading loss),

A = $exp\,[-\mathcal{E} r]$: pertes par absorption,

R = $\rho_b^{W_b}$, $\rho_s^{W_s}$: pertes par réflexion sur les frontières : fond, surface,

D = pertes par directivité verticale d'antenne : $D \leqslant 1$

L'addition incohérente de toutes les intensités en P fournit une valeur estimée des pertes moyennes :

$$L = \sum_{\nu=1}^{n} L_\nu$$

Les pertes géométriques associées au rayon ν sont déduites du principe de conservation de l'énergie sonore dans un pinceau fin :

$$S_\nu = \frac{I_{P,\nu}}{I_0} = \frac{\sigma_0}{\sigma_P} \frac{\cos\beta}{\cos\alpha}$$

avec : σ_0 = $\Delta\varphi\,\Delta\alpha\, r_0^2 \cos\alpha$ section du pinceau à la distance de référence r_0 ,

σ_P = $\Delta\varphi\,\Delta b\; x$ section du pinceau au point P à la distance x ,

α = angle du rayon à la source,

β = angle du rayon au point P,

Δb = longueur de l'arc du front d'onde en P .

Pour calculer S en un point quelconque du plan vertical x , z l'ouverture $\Delta\alpha$ du pinceau est considérée comme infiniment petite d'où :

$$S = \frac{r_0^2 \cos\beta}{x\,(\partial\beta/\partial\alpha)_{\beta=constante}} = \frac{r_0^2}{x\,(\partial z/\partial\alpha)_{\beta=constante}}$$

On suppose dans cette équation que le front d'onde en P se comporte normalement et qu'en particulier il ne se replie pas comme cela se produit sur les caustiques et aux foyers.

3.- CALCUL DES "PERTES GEOMETRIQUES" PAR RAIBAC

On a cherché dans RAIBAC une méthode simple et rapide de calcul de la valeur moyenne de l'intensité sonore ou "intensité efficace" à l'intérieur d'un domaine spatial donné entourant le point P considéré.

Une stratégie systématique de simplification et de calcul de valeur moyenne a été appliquée selon quatre directions :

. valeur moyenne verticale,
. valeur moyenne horizontale,
. valeur moyenne dans un domaine rectangulaire,
. lissage des erreurs de quantification.

3.1 Valeur moyenne verticale

Au lieu de calculer avec précision les pertes géométriques en un grand nombre de points et d'en établir la valeur moyenne ensuite, RAIBAC recherche directement cette valeur moyenne en considérant des pinceaux sonores d'ouverture finie :

$$S_\nu^{(1)} = \frac{r_0^2 \ |\Delta\alpha|}{x \ |\Delta Z|}$$

quand ΔZ augmente avec la distance x , la valeur moyenne est donc calculée sur un intervalle vertical de plus en plus grand.

3.2 Valeur moyenne horizontale

Au calcul de la valeur moyenne de S_ν sur l'intervalle u , à partir de nombreuses valeurs de $S_\nu(Z)$ correspondant à différents ΔZ, RAIBAC substitue le calcul direct de S_ν à partir de la valeur moyenne $\overline{\Delta Z}$ sur u :

$$\overline{\Delta Z} = \frac{1}{2}\left(|\Delta Z_{gauche}| + |\Delta Z_{droite}| \right)$$

D'où l'on tire l'expression de S_ν sur un domaine du plan profondeur distance :

$$S_\nu^{(2)} = \frac{r_0^2 \ |\Delta\alpha|}{x \ \overline{\Delta Z}}$$

3.3 Valeur moyenne dans un domaine rectangulaire

Parce que leurs limites inférieures et supérieures sont constituées par des segments de rayons, les domaines précédemment calculés ont des formes compliquées que l'ordinateur doit conserver en mémoire ainsi que leur position. D'autre part comme $\overline{\Delta Z}$ devient très petit au voisinage des caustiques, l'intérêt de la méthode est perdu là où celle-ci est la plus nécessaire.

Pour tourner cette difficulté la valeur moyenne de l'intensité sonore est calculée dans des domaines rectangulaires de dimensions constantes ($u \times v$) constituant dans le plan distance-profondeur une représentation matricielle du champ sonore. Le passage d'un type de domaine à l'autre est obtenu en pondérant la contribution de chaque pinceau par le rapport μ_ν / uv des aires des deux domaines :

$$S_\nu^{(3)} = \frac{\mu_\nu}{uv} S_\nu^{(2)} = \frac{\mu_\nu \, r_0^2 \ \Delta\alpha_\nu}{uv \, x \ \overline{\Delta Z}_\nu}$$

qui devient en exprimant x en fonction du nombre m de la colonne considérée :

$$S_\nu^{(3)} = \frac{r_0^2 \ \Delta\alpha}{(m-\frac{1}{2})\, u \, d_\nu^*}$$

d_ν^* étant un facteur tenant compte de l'aire μ_ν du domaine initial.

Cette formule est l'élément essentiel du modèle RAIBAC. Lors du tracé d'un rayon il suffit de calculer $S_\nu^{(3)}$ pour chaque domaine (k, m) rencontré. Le résultat est alors multiplié par les pertes appropriées ARD et ajouté à la valeur de l'élément correspondant de la matrice considérée. Une fois tous les rayons tracés chaque élément $\hat{L}$ de cette matrice contient la somme des contributions des pinceaux individuels :

$$\hat{L}^{(3)}_{[k,m]} = L^{(3)}_{[v(k-\frac{1}{2}),\, u(m-\frac{1}{2})]} = \sum_\nu A_\nu R_\nu D_\nu S_\nu^{(3)}$$

3.4 Lissage des erreurs de quantification

Pour éviter les discontinuités sur $L^{(3)}$ dans le plan distance profondeur du fait de la quantification introduite par les domaines d'aire constante, on procède à un lissage par convolution avec une fonction triangulaire des points voisins.

$$\hat{L}^{(4)}_{[k,m]} = \frac{1}{4} \sum_{\xi=-1}^{1} \sum_{\zeta=-1}^{1} 2^{-|\xi|-|\zeta|} \ \hat{L}^{(3)}_{[k-\xi,\, m-\zeta]}$$

4.- COMPORTEMENT DU MODELE LORS DE REFLEXIONS ET DE CAUSTIQUES

Pour éviter des intersections erronées de rayon par réflexion sur les frontières, le milieu marin et son système de coordonnées sont dépliés au sens de BARTBERGER [7] par effets de miroir sur le fond et à la surface.

Les croisements subsistent par contre sur les caustiques. Certains modèles : NISSM II [3], FACT [2] ou MPP [8] ont résolu ce problème par des raffinements de la théorie des rayons. Dans RAIBAC par contre on s'est contenté de diminuer l'influence des pinceaux fins en déduisant les pertes dans les régions des caustiques, du nombre de pinceaux traversant un domaine donné.

5.- QUELQUES CARACTERISTIQUES DU PROGRAMME RAIBAC

L'algorithme RAIBAC (Reverberation and Average Intensity of Broadband Acoustical Signals) est un programme Fortran d'environ 800 instructions, capable de calculer le champ sonore et les niveaux de réverbération d'un sonar monostatique. On notera parmi les données d'entrée utilisées :

- un profil de célérité à gradients constants dans chaque couche,
- un coefficient de réverbération de volume constant dans chaque couche,
- une source acoustique placée obligatoirement à l'intersection de deux couches.

5.1 Rayons critiques

Aux profondeurs où le profil de célérité connaît un maximum, les rayons d'incidence nulle sont dédoublés en une composante ascendante et une composante descendante, laissant une zone d'ombre entre eux.

Ces rayons critiques sont tracés deux fois et constituent les frontières de domaines angulaires distincts :

- rayons se propageant par réfraction,
- rayons mixtes réfraction-dédoublement,
- rayons mixtes réfraction-réflexion ou dédoublement-réflexion,
- rayons se propageant par réflexion sur les deux frontières.

L'ouverture des pinceaux sonores est limitée à 1° en introduisant des rayons entre chaque rayon critique.

5.2 Pertes par absorption

Le coefficient d'absorption en fonction de la fréquence du signal émis est dérivé des formules empiriques de THORP et SHULKIN, et MARSH.

5.3 Réverbération

Si l'on considère que l'Océan se comporte comme un filtre linéaire indépendant du temps vis-à-vis de la valeur de l'intensité réverbérée $I_R(t)$, celle-ci est obtenue à partir de l'intensité transmise I_T et de la réponse impulsionnelle du milieu par :

$$I_R(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} I_T[t-t']p[t']dt'$$

avec, pour des signaux de forme rectangulaire :

$$I_T[t] = \begin{cases} I_0, & 0 \leqslant t \leqslant \tau \\ 0, & \text{partout ailleurs.} \end{cases}$$

d'où :

$$I_R(t) = I_0 \int_{t-\tau}^{t} p(t')dt'$$

et si le signal est de courte durée δt vis-à-vis de $p[t]$:

$$\langle I_R(t)\rangle = I_0\, \delta t\, p(t)$$

Le coefficient de diffusion de volume q_V , ou de surface q_S, étant défini par :

$$q = \frac{r^2 \langle I_R(t)\rangle}{I_p\, \delta\sigma}$$

avec : I_p intensité de l'onde plane incidente

$\delta\sigma$ volume ou surface illuminée à la distance r .

En introduisant les pertes par propagation $L[t]$ on obtient les coefficients :

$$p_b(t) = \frac{L^2(t)}{r_0^2}\,\frac{1}{2}\, c_s\, x\, \Delta\varphi\, q_b(\beta) \quad \text{: frontières,}$$

$$p_V(t) = \frac{L^2(t)}{r_0^2}\,\frac{1}{2}\, c_s\, x\, \Delta\varphi \int_h q_v \cos[\beta]\, dz \quad \text{: volume,}$$

D'où l'on tire que la contribution du domaine $\{k.m\}$ illuminé par le pinceau γ est :

$$\hat{p}_\gamma[m] = \frac{c_s\,\Delta\varphi\, u(m-1/2)}{2 r_0^2}\, L_\gamma^{(3)}[k,m]^2 \left(\tilde{q}_v[k]\, v \cos[\beta] + q_b[\beta]\right)$$

5.- VERIFICATIONS THEORIQUES DU MODELE

RAIBAC a été soumis aux tests de WOOD [9-10] afin de vérifier l'exactitude de sa formulation et son comportement au voisinage des caustiques.

Test A : Pour un profil de célérité à gradient constant : $C(z) = gz$, il existe une solution exacte de l'équation de propagation, débarrassée de caustiques et indépendante de la fréquence.

Test B : Le profil de célérité :

$$C(z)=\sqrt{C_s^2/(2gz)}$$

fournit la caustique la plus simple connue.

Les écarts entre RAIBAC et le modèle théorique sont pour chaque test inférieurs à 2dB.

7.- VERIFICATIONS EXPERIMENTALES

Les performances de RAIBAC ont été comparées à des données calibrées mesurées en mer pour des expériences de propagation par grands fonds et petits fonds. Dans tous les cas étudiés les prédictions de RAIBAC se situent à l'intérieur du nuage des points mesurés. On notera cependant la très grande sensibilité du modèle aux variations du coefficient de réflexion sur le fond dans le cas de propagation en eaux peu profondes qui rend les prédictions douteuses en été.

8.- CONCLUSION

RAIBAC est un nouvel algorithme de calcul du champ sonore efficace, ou valeur moyenne du champ dans un volume fini donné, par les méthodes de la théorie des rayons. Le parti pris systématique de simplification et de calcul de valeurs moyennes a permis une réduction considérable des efforts de calcul. Les résultats sont présentés sous la forme d'une matrice dont les éléments sont égaux à la valeur du champ sonore efficace dans des domaines de taille constante du plan distance profondeur. Cette disposition permet le calcul de la réverbération.

Confronté à des tests théoriques et à des vérifications expérimentales, RAIBAC n'a pas été mis en échec jusqu'à présent.

Les résultats présentés dans ce document proviennent de travaux exécutés à SACLANTCEN-LA SPEZIA en étroite collaboration avec W. BACHMANN et feront l'objet prochainement d'une publication commune plus détaillée dans JASA.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] COHEN (J.S) and WEINBERG (H). Continuous Gradient Ray-Tracing System.
CONGRATS, NUSC Reports 1069, 1052 et 4071 New-London Conn.US NAVAL Underwater Systems Center.

[2] SPOFFORD (C.W). An Ultra fast Special-purpose Ray Tracing Program.
Bell Telephone Laboratories. Continuation of Long-Range Acoustic Propagation Program, Whippany NJ (item 5).

[3] WEINBERG. Navy Interim Surface Ship Model (NISSM)II, NUC.
Technical Publication 372. New London Conn. US Naval Underwater Systems Center, 1973.

[4] CLARKE (R.H). Development of a Theoretical Model for Sound Propagation in a Variable Ocean.
SACLANTCEN SR-8. La Spezia Italy.

[5] MELLEN (R.H). Ray Diffusion in an Ocean-Front Region.
SACLANTCEN SM-22. La Spezia Italy (AD 767 813/9GA).

[6] SMITH Jr (P.W). Averaged Sound Transmission in Range Dependent Channels.
J. Acoust. Soc. Am., 55, 1197-1204(1974).

[7] BARTHERGER (C.L). A Review of some Development in Ray Tracing at the Naval Air Development Center.
SACLANTCEN Conference Proceeding CP-5, Pt. 1. La Spezia, Italy (AD 742 466).

[8] SPOFFORD (C.W). The Bell Laboratories Multiple-Profile Ray Tracing Program.
Bell Telephone Laboratories. Long Range Acoustic Propagation Final Report Whippany NJ (item 3).

[9] WOOD (D.H). Greens Functions for Umbounded Constant Gradient Media.
J. Acoustic. Soc. Am., 46, 1333-1339,(1969).

[10] WOOD (D.H). An Example of Uniform Approximation near a caustic.
J. Acoust. Soc. Am., 55, 470-1(A), 1974.
