

COLLOQUE NATIONAL SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 16 au 21 JUIN 75



PERFORMANCES DE CERTAINS SIGNAUX SONAR ANIMAUX A MODULATION HOMO-
GRAPHIQUE EN PRESENCE D'HARMONIQUES

C. PARD* M. BEROUJON - B. ESCUDIE - A. HELLION **
J.A. SIMMONS***

* Centre d'Etude des Phénomènes Aléatoires GRENOBLE
** Institut de Chimie et Physique Industrielles de LYON

*** Psychology Dept. Université Washington
St LOUIS - U.S.A.

RESUME

Certains systèmes SONAR des chauve-souris utilisent des signaux modulés homographiquement en fréquence. L'étude de la fonction d'ambiguïté montre que la tolérance à l'effet DOPPLER dépend du nombre n de périodes émises, de la bande spectrale B occupée.

Des résultats expérimentaux récents confirment diverses hypothèses déjà avancées. L'influence des harmoniques contenues dans le signal émis se manifeste sur la résolution angulaire et l'identification des cibles.

SUMMARY

Some Bat's SONAR systems use hyperbolic frequency modulated signals. Ambiguity function shows that the DOPPLER Tolerance depends on n number of periods, B spectral bandwidth of the emitted signal.

New experimental results are in agreement with some models published before. Harmonic rate of the emitted signal improves angular resolution and target identification, as measured on bat's performances.



1. INTRODUCTION

Les résultats obtenus tant par voie expérimentale que théorique sur les chauve-souris ou sur les dauphins (1) (2), suggèrent, à la lumière de précédents travaux (3) que la modélisation des signaux émis par les systèmes SONAR animaux est parvenue à un point permettant d'apporter certaines explications des performances observées.

Diverses hypothèses faites, et notamment celle d'un traitement cohérent, semblent se confirmer de plus en plus. Nous allons mettre en évidence quelques uns de ces points.

1. SIGNAUX A MODULATION HOMOGRAPHIQUE DE FREQUENCE

a) Expression de la fonction d'ambiguïté

L'observation des signaux émis par de nombreuses chauve-souris (1) (2) (4) (5) montre que le produit bande durée BT varie dans les limites suivantes : $20 \leq BT < 600$

La formulation du signal analytique et de la fonction de corrélation est alors particulièrement commode à l'aide du procédé de la "phase stationnaire" (3) (7). Il sera mis à profit dans un des paragraphes suivants.

Le signal est représenté de la manière suivante :

période instantanée $\theta_i(t) = at + b$
 fréquence instantanée $\nu_i(t) = \frac{1}{at + b}$
 phase instantanée $\phi(t) = \int_0^t 2\pi \nu_i(\theta) d\theta$

avec $a = \frac{\alpha - 1}{T} \theta_d$
 $b = \theta_d$ θ_d, θ_f et ν_d, ν_f étant les périodes et fréquences initiales et finales
 $\alpha = \frac{\nu_d}{\nu_f}$ taux de modulation
 T durée du signal

$S(t) = F(t) \cos \phi(t)$

En remarquant que la formulation la plus correcte de la fonction d'Ambiguïté est celle dite de KELLY WISHNER dans le cas de cibles mobiles (6), $\chi_s(\tau, \eta)$ fonction d'Ambiguïté s'écrit :

avec $\chi_s(\tau, \eta) = \int_A \sqrt{\eta} S(t) S(\eta(t-\tau)) dt$

- $S(t)$ signal émis
- $S(\eta t)$ signal écho dopplérisé
- $\eta = 1 - \frac{2v\alpha}{c}$ taux de Doppler
- $\frac{v}{c}$ vitesse relative émetteur-cible
- c vitesse du son dans le milieu considéré

$S(t) = \Pi_T(t - \frac{T}{2}) \sin \left[\frac{2\pi}{\alpha} \log \left| 1 + \frac{a}{b} t \right| \right]$

b) Mise en évidence d'une trace particulière du plan (τ, η) , lieu de certains extrema

Soit $\tau_m(\eta)$ l'équation de cette trace. Il existe deux méthodes pour rechercher la trace $\tau_m(\eta)$, caractéristique de certains extrema.

La première méthode consiste à déterminer le retard τ tel que : $\nu_i'(t - \tau_m(\eta)) = \nu_i(t)$ avec $\nu_i'(t)$ fréquence instantanée du signal dopplérisé. Ce qui conduit à :

$\tau_m(\eta) = \frac{T}{\alpha - 1} \frac{1 - \eta}{\eta}$

Les deux courbes $\nu_i(t)$ et $\nu_i(t - \tau_m(\eta))$ étant confondues sur un intervalle de temps $[t_1, t_2]$ (figure 1), le déphasage $\Delta \phi$ entre $S(t)$ et $S(\eta(t - \tau_m))$ est constant sur cet intervalle.

Pour $\Delta \phi = \phi(t) - \phi(\eta(t - \tau_m)) = K\pi$, on obtient donc un maximum relatif de $\chi_s(\tau, \eta)$ dont la trace dans le plan (τ, η) appartient à la courbe

$\tau_m(\eta) = \frac{T}{\alpha - 1} \frac{1 - \eta}{\eta}$

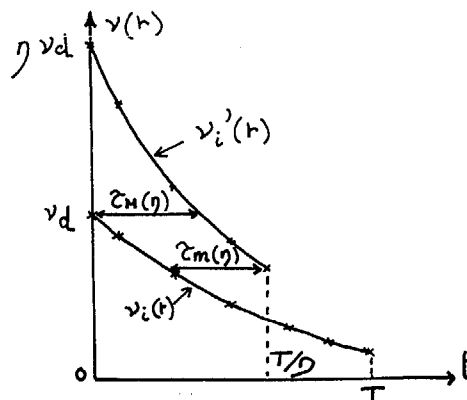


FIGURE 1

L'autre procédé consiste à chercher les valeurs de τ et de η vérifiant l'équation :

$\frac{d}{d\tau} [\Delta \phi(\tau, \tau_m)] = 0$ C'est ce procédé qui est mis à profit dans la méthode de calcul du paragraphe suivant.

c) Expression analytique, sous certaines hypothèses, de la fonction d'ambiguïté $\chi_s(\tau, \eta)$

$S(t) = \Pi_T(t - \frac{T}{2}) \sin \left[\frac{2\pi}{\alpha} \log |1 + \frac{a}{b} t| \right]$

Pour $0 < \tau < T$ et $\eta < 1$, la fonction d'ambiguïté $\chi_s(\tau, \eta)$ s'écrit :

$\chi_s(\tau, \eta) = \sqrt{\eta} \int_{\tau}^T \cos \left[\frac{2\pi}{\alpha} \log \frac{1 + \frac{a}{b} t}{1 + \frac{a}{b} \eta(t - \tau)} \right] \cdot \sqrt{\eta} \int_{\tau}^T \cos \left[\frac{2\pi}{\alpha} \log (1 + \frac{a}{b} t) (1 + \frac{a}{b} \eta(t - \tau)) \right] dt$

Si $BT \gg 1$, $\chi_s(\tau, \eta)$ est pratiquement limitée

à un support de mesure τ_c tel que $\tau_c < T$. De plus on montre que $\varphi_1(t) = \frac{2\pi}{\alpha} \log (1 + \frac{a}{b} t) (1 + \frac{a}{b} \eta(t - \tau))$ varie de 100 à 1000 fois plus vite que

$\varphi_2 = \frac{2\pi}{\alpha} \log \frac{1 + \frac{a}{b} t}{1 + \frac{a}{b} \eta(t - \tau)}$, ceci pour $0 < \tau < \frac{T}{10}$, $\tau < t < T$ et pour des valeurs de η, α, T, ν_d correspondant aux signaux SONAR habituels des chauve-souris et



PERFORMANCES DE CERTAINS SIGNAUX SONAR ANIMAUX A MODULATION HOMOGRAPHIQUE EN PRESENCE D'HARMONIQUES

et des dauphins. On peut négliger l'intégrale $\Pi(z)$ (pour $z = z_m(\eta)$, $\Pi(z) \leq \frac{\alpha-1}{4\pi} \frac{1}{T \cdot \nu_d} I(z)$).

en pratique les signaux de chauve-souris sont tels que $T \cdot \nu_d \geq 20$ et $\alpha \leq 3$, ce qui entraîne $\Pi(z) \leq \frac{I(z)}{120}$

$\chi_s(z, \eta)$ se réduit donc à l'expression suivante

$$\chi_s(z, \eta) = \int_0^T \sqrt{\eta} \cos \left[\frac{2\pi}{\alpha} \text{Log} \left| \frac{1 + at/b}{1 + \frac{a}{b} \eta (t-z)} \right| \right] dt$$

Ceci pour $0 < z < T$ et $\eta < 1$. (Pour $\eta > 1$, la fonction d'ambiguïté $\chi_s(z, \eta)$ s'écrit : pour $-\frac{T}{\eta} < z < 0$

$$\chi_s(z, \eta) = \int_0^T \sqrt{\eta} \cos \left[\frac{2\pi}{\alpha} \text{Log} \left| \frac{1 + at/b}{1 + \frac{a}{b} \eta (t-z)} \right| \right] dt$$

En faisant l'approximation $\text{Log}(1+\epsilon) \approx \epsilon$ si $\epsilon \rightarrow 0$ ce qui est justifié si $\frac{z}{T} \ll 1$ et $0,9 < \eta < 1$, il vient :

$$\chi_s(z, \eta) = \frac{T}{2\sqrt{\eta}(\alpha-1)} \left[(1+\eta(\alpha-1)(1-\frac{z}{T})) \cos \left[\frac{2\pi \eta \nu_d}{1+\eta(\alpha-1)(1-\frac{z}{T})} \left(z + \frac{1-\eta}{\eta} T \right) \right] - \cos \left(\frac{2\pi \nu_d z}{\sqrt{\eta}(\alpha-1)} \right) \left(z_M - z \right) \cos \left(\frac{2\pi \nu_d z}{\sqrt{\eta}(\alpha-1)} \right) \left[\text{Si} \left(\frac{2\pi \nu_d (z_M - z)}{(1+\eta(\alpha-1)(1-\frac{z}{T}))} \right) - \text{Si} \left(\frac{2\pi \nu_d (z_M - z)}{\sqrt{\eta}(\alpha-1)} \right) \right] - \text{ou} \left(\frac{2\pi \nu_d z_M}{\sqrt{\eta}(\alpha-1)} \right) \left[\text{Ci} \left(\frac{2\pi \nu_d (z_M - z)}{(1+\eta(\alpha-1)(1-\frac{z}{T}))} \right) - \text{Ci} \left(\frac{2\pi \nu_d (z_M - z)}{\sqrt{\eta}(\alpha-1)} \right) \right] \right]$$

L'hypothèse $0,9 \leq \eta \leq 1$ implique des vitesses relatives cible chauve-souris inférieures à $v = 15 \text{ m/s} \approx 50 \text{ km/h}$, conditions habituelles d'opération de ces animaux. Pour $z = z_m(\eta)$, il vient :

$$\chi_s(z_m(\eta), \eta) = \frac{1}{2} \sqrt{\eta} \cdot T \alpha^{-1} \cdot (\alpha \eta - 1) \cos \left(\frac{2\pi}{\alpha} \text{Log} \eta \right)$$

Partant des signaux enregistrés par J.A.

SIMMONS sur *Eptesicus Fuscus*, le calcul de $\chi_s(z, \eta)$ a été effectué pour les trois harmoniques de l'émission SONAR de cet animal :

$$a = 0,02 \quad \alpha = 0,01 \quad a = 0,066 \quad BT = 25 \text{ (fondamental)}$$

$$T = 1 \text{ ms} \quad \alpha = 2 \quad \nu_d = 50 \text{ KHz} \quad \nu_p = 25 \text{ KHz (fondamental)}$$

Ce signal synthétisé au moyen d'un générateur (8) a été traité à l'aide d'un ambiguïmètre fournissant $\chi_s(z, \eta)$ pour $0,9 \leq \eta \leq 1,1$.

Les deux résultats concordent avec une précision inférieure à 5 %, comme le montre la figure 2.

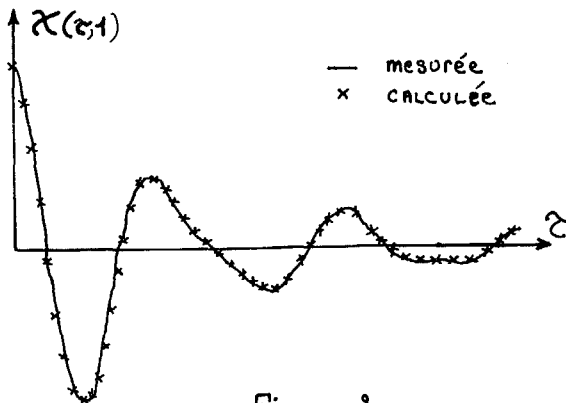


Figure 2

La tolérance à l'effet DOPPLER peut être définie par deux critères : la décroissance plus ou moins rapide des extrema de la fonction d'ambiguïté

lorsque la vitesse relative cible émetteur augmente et l'erreur plus ou moins grande faite sur l'estimation de la distance cible émetteur, due au déplacement de ces extrema par rapport à l'axe $z = 0$. Il s'agit donc de formuler ces deux effets, l'un d'erreur de biais sur l'estimation de la date, l'autre de perte de performance en rapport signal sur bruit en sortie du traitement.

d) Etude du comportement de $\chi(z, \eta)$ le long de la trace $z_m(\eta)$

Sur la trace $z_m(\eta) = \frac{T}{\alpha-1} \frac{1-\eta}{\eta}$, la fonction d'ambiguïté s'exprime par :

$$\chi(z_m(\eta), \eta) = \frac{T(\alpha\eta-1)}{2(\alpha-1)\sqrt{\eta}} \cos \left(\frac{2\pi}{\alpha} \text{Log} \eta \right); \eta < 1$$

Les extrema de $\chi(z_m, \eta)$ sont donnés pour $\eta = e^{-\frac{k \text{Log} \alpha}{2\pi}}$ K entier, les zéros pour $\eta = e^{-\frac{(2k+1) \text{Log} \alpha}{4\pi}}$ (figure 3). L'allure de $\chi(z, \eta)$ est représentée figure 3 pour ces valeurs particulières de η .

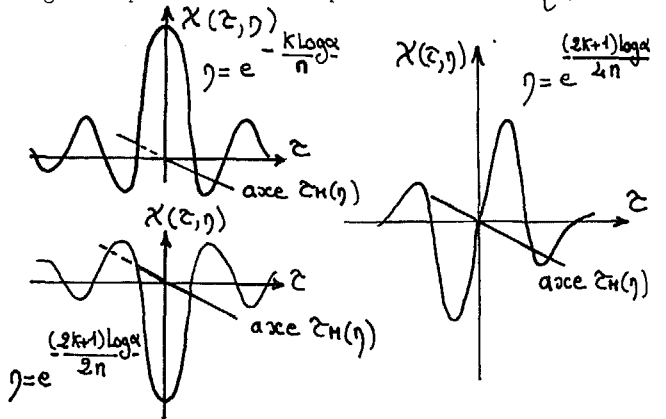


Figure 3

Les maxima relatifs de $\chi(z, \eta)$, à η donné appartenant à une courbe $f(\eta)$; $z_m(\eta)$ et $f(\eta)$ sont donc confondues aux points de coordonnées

$$(\eta_{\text{max}} = e^{-\frac{k \text{Log} \alpha}{2\pi}}, z = z_m(\eta_{\text{max}}))$$

. Si n est grand (signaux de veille), la surface d'ambiguïté a pratiquement pour arête la trace $z_m(\eta)$. En effet, les maxima de $\chi(z, \eta)$, dont la trace dans le plan (z, η) appartient à $z_m(\eta)$, sont très rapprochés les uns des autres par rapport au domaine de taux Doppler η considéré. A titre d'exemple nous avons calculé les abscisses η de ces maxima pour les deux signaux suivants.

- *Eptesicus Fuscus* $T = 8 \text{ ms}$ $\alpha = 2$ $\nu_d = 55 \text{ KHz}$
Signal de veille
- *Vampyrum Spectrum* $T = 18 \text{ ms}$ $\alpha = 1,25$ $\nu_d = 20 \text{ KHz}$
Signal de veille

PERFORMANCES DE CERTAINS SIGNAUX SONAR ANIMAUX A MODULATION HOMOGRAPHIQUE EN PRESENCE D'HARMONIQUES

Vampyrum Spectrum η_{MAX}	Eptesicus Fuscus η_{MAX}
0,9993	0,9977
0,9986	0,9954
0,9979	0,993
0,9972	0,991
0,9965	0,989

e) Tolérance à l'effet Doppler

L'erreur de biais introduite lors de l'estimation de la distance, se traduit par l'équation de la trace $\zeta_H(\eta) = \frac{T}{\alpha-1} \frac{1-\eta}{\eta} \approx \frac{T}{\alpha-1} (1-\eta)$, $0,99 \leq \eta < 1$. Cette erreur est liée à la pente de la droite soit $\frac{T}{\alpha-1}$. Ceci nécessite pour des estimations correctes de la distance, T faible et α grand. En pratique α est borné par 3. Les signaux permettant des estimations précises en distance seront de durée brève et à forte modulation.

La perte de performances liée à la pente de χ_s au long de la trace $\zeta_H(\eta)$ se caractérise par l'expression suivante :

$$\begin{cases} \chi_s(\zeta_H, \eta) = \frac{\chi(0,1)}{\sqrt{\eta}} \frac{1}{\alpha-1} (\alpha\eta-1) \cos\left(\frac{2\pi}{\alpha} \log(\eta)\right), \eta < 1 \\ \chi_s(\zeta_H, \eta) = \frac{\chi(0,1)}{\sqrt{\eta}} \frac{1}{\alpha-1} (\alpha-\eta) \cos\left(\frac{2\pi}{\alpha} \log(\eta)\right), \eta > 1. \end{cases}$$

pour $0,9 \leq \eta \leq 1,1$ (cas des chauve souris) la rapidité de décroissance (cf figure 4) est liée à α . En effet pour les valeurs de η considérées le comportement de χ_s dépend du terme $\frac{\alpha\eta-1}{\sqrt{\eta}(\alpha-1)}$. Afin de rendre la coupe $\chi(\zeta_H, \eta)$ lentement décroissante il faut que α soit le plus grand possible.

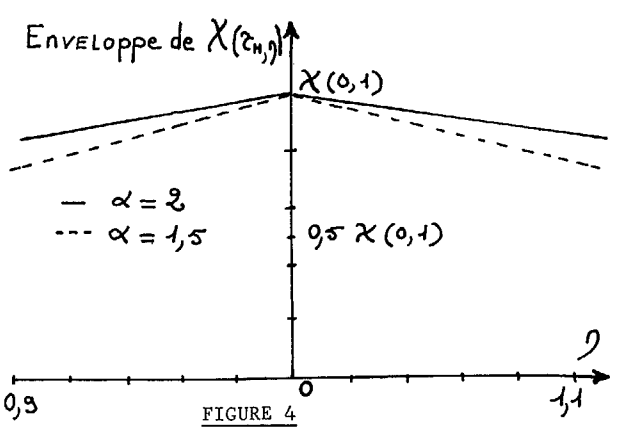


FIGURE 4

Pour les signaux de veille utilisés en détection lointaine, où T est grand, l'erreur de biais a moins d'importance qu'en poursuite. Dans le cas de la veille où $n = \frac{\log \eta}{\alpha-1} T \eta d$ est grand la courbe $f(\eta)$ et la trace $\zeta_H(\eta)$ sont confondues.

Pour les signaux de poursuite ces deux courbes sont distinctes mais le décroissance des maxima est analogue.

Si n est très faible ($n \approx 2 \text{ à } 3$) ce qui est le cas de certains signaux émis par les Dauphins, l'étude de χ_s fait apparaître une muraille, où il n'existe aucun zéro. En effet :

$$\rho_0 = e^{-\frac{\kappa \log \eta}{\alpha}} \quad (\kappa=1) \quad \text{correspond à}$$

$$\rho_0 = 0,95 \quad (\alpha=1,42)$$

L'abscisse du premier zéro de χ_s sur la trace est située en dehors de la gamme de vitesse utilisée par cet animal (2).

Divers auteurs ont étudié l'effet de Tolérance DOPPLER avec d'autres définitions (4,6,7,9,10) L'étude des deux effets cités ci-dessus fait apparaître dans la panoplie des signaux SONAR des chauve-souris les deux objectifs suivants :

- . détection ou estimation de distance grande où l'erreur de biais est peu influente
- . poursuite ou estimation de distance fine où l'erreur de biais est fortement réduite

La figure 5 représente les traces $\zeta_H(\eta)$ pour un certain nombre de ces signaux.

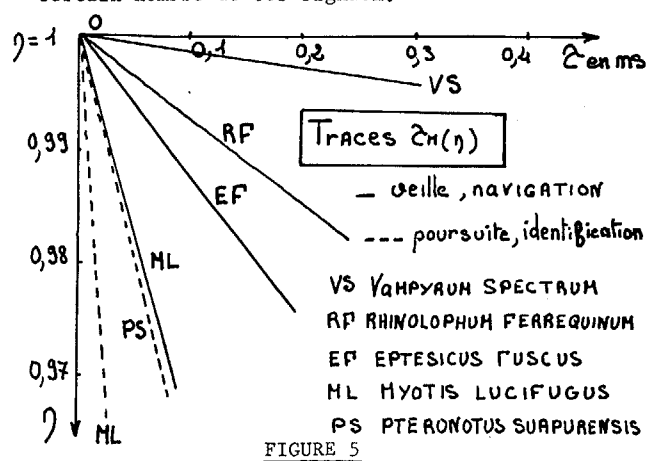


FIGURE 5

Les signaux utilisés permettent une estimation correcte de la distance, sans estimation directe de la vitesse. A l'inverse les chauve-souris utilisant des signaux "diversité", peuvent estimer directement distance et vitesse (3).

2. EMISSION D'HARMONIQUES D'UN SIGNAL FONDAMENTAL

a) Harmoniques et fonction de corrélation ou d'ambiguïté

Des études à l'aide de la représentation temps fréquence montrent que certaines chauve-souris émettent des signaux harmoniques tels que :

$$K v_i(t) \approx v_{iK}(t) \quad S(t) = \sum_{k=1}^N b_k F(t) \cos \Phi_k(t) = \sum_{k=1}^N S_k(t)$$

$$\Phi_k(t) = 2\pi \int_0^t \gamma_i(\theta) d\theta \quad S_k(t) \approx \gamma_k(\nu)$$

En appelant $\Delta\phi(t) = \phi(t) - \phi(t-\tau)$ et en rendant $\Delta\phi = \frac{\pi}{2}$

$$\Delta\phi = \frac{1}{T-\tau} \int_{T-\tau}^T \Delta\phi(t) dt$$

il en découle que le premier zéro de



$\Gamma_S(\tau)$ a lieu pour :

$$\Gamma_S(\tau_0) = 0 \quad \tau_0 = \frac{1}{2\nu_0} = \frac{T}{2n}, \quad \nu_0 = \frac{1}{T} \int_0^T \nu_i(\theta) d\theta = \frac{\nu d \log \alpha}{\alpha - 1}$$

Remarquons que si les densités spectrales relatives à chaque harmonique sont spectralement disjointes et sous certaines conditions (3) on peut écrire la fonction d'ambiguïté :

$$\chi_S(\tau, \eta) = \sum_k \chi_{S_k}(\tau, \eta)$$

Les différentes fonctions χ_{S_k} sont toutes identiques à un facteur de pondération près. En effet, $\alpha = \frac{\nu d}{\nu_0}$ est constant quelque soit le rang de l'harmonique, T est aussi une constante. La trace $\tau_H(\eta)$ est inchangée, mais n'augmentant avec le rang les maxima se concentrent vers l'origine et l'arête de χ_S est encore plus accusée.

Dans ce cas la fonction de corrélation s'écrit pour $\tau \approx 0$ (3) : $\Gamma_S(\tau) = P_N(\cos 2\pi\nu_0\tau)$ où P_N est un polynôme d'ordre N , avec N nombre d'harmoniques présents. Nous avons calculé τ_0 pour $N = 2$ et $N = 3$, en appelant ξ et α le taux d'harmoniques de rang 2 ou 3 exprimé par leur rapport de puissance à celle du fondamental.

$$\begin{cases} \tau_{0+2} = \frac{T}{2\pi n} \arccos \left[\frac{1}{4\xi} (\sqrt{1+8\xi^2} - 1) \right] \\ \tau_{0+3} = \frac{T}{2\pi n}; (\alpha < \frac{1}{3}); \tau_{0+3} = \frac{T}{2\pi n} \arccos \left[\frac{4\alpha - 1}{4\alpha} \right]; (\alpha \geq \frac{1}{3}) \end{cases}$$

τ_0 premier zéro de $\Gamma_S(\tau)$ décroît avec le nombre N d'harmoniques présents dans l'émission,

Nous avons vérifié la valeur de τ_0 calculé par la mesure de $\Gamma_S(\tau)$ sur un signal de veille émis par *Eptesicus Fuscus*. Les paramètres sont les suivants $T = 7,4 \text{ ms}$, $n = 256$, $\nu d = 50 \text{ kHz}$, $\alpha = 2$, $\theta T = 185$. La figure 6 représente l'évolution de τ_0 calculé et mesuré en fonction de $10 \log_{10} \xi$. Le signal étudié correspond au point noté A, $\xi = 1$. L'écart entre mesure et calcul conduit à une erreur relative de 2%. L'introduction des harmoniques amène un "pincement" du "lobe central" de la fonction de corrélation. Ceci permet d'affirmer qu'il fournissent une meilleure résolution "fine" en distance et en angle.

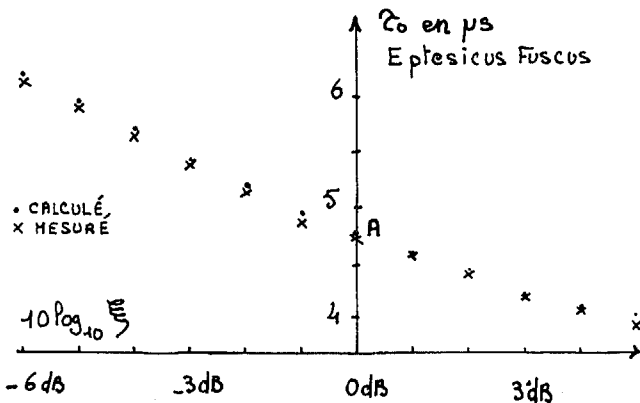


FIGURE 6

b) Résolution différentielle, identification des cibles et émission harmonique

Une étude récente réalisée par J.A. SIMMONS montre que la "résolution fine" en distance lors de la télémétrie différentielle sur deux cibles voisines met en jeu la "structure fine" de $\Gamma_S(\tau)$, à la différence de l'estimation distance qui met en jeu l'enveloppe de $\Gamma_S(\tau)$ (1) (12) (14) (15).

La résolution obtenue par la chauve-souris *Eptesicus Fuscus* sur des cibles portant des trous de profondeur inégale à 0,6 mm près, correspond à des valeurs pour τ_0 de l'ordre de 4 μs . Or nous avons vu que $\tau_0(\xi) \approx 4,75 \mu\text{s}$ si $\xi = 1$. En fait, la chauve-souris utilise ^{aussi} un harmonique de rang 3.

A ce sujet l'étude de la densité spectrale du signal (figure 7) montre que pour $BT = 50$, et les conditions d'émission, il existe des recouvrements spectraux entre $\delta_{S_1}(\nu), \delta_{S_2}, \delta_{S_3}$. En fait, seul le second recouvrement est à prendre en compte. En effet : $\delta_{S_{1+2}}(\nu) = \delta_1(\nu) + \delta_2(\nu) + 2 \text{Re} \delta_{12}(\nu)$ $\delta_{12}(\nu) = \delta_1(\nu) \delta_2^*(\nu)$

$$\Gamma_{S_{1+2}}(\tau) = \Gamma_{S_1}(\tau) + \Gamma_{S_2}(\tau) + \Gamma_{12}(\tau) + \Gamma_{12}(-\tau)$$

Or $\text{Re} \delta_{12}(\nu)$ est une fonction paire et $\text{Re} \delta_{12}(\nu) \leq |\delta_1| |\delta_2|$
 Appelons $G(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \text{Re} \delta_{12}(\nu) \cos(2\pi\nu\tau) d\nu$
 et notons que $\cos(2\pi\nu\tau)$ est borné par l'unité

d'où $\Gamma_{S_{1+2}}(0) \leq \Gamma_{S_1}(0) + \Gamma_{S_2}(0) + 2G_{12}(0)$; $G_{12}(\tau) \leq 2 \int_{-\infty}^{\infty} |\delta_1 \delta_2| d\nu$
 Pratiquement la figure 7 montre que $(G_{12})_{\text{MAX}}$ est de l'ordre de 1/50 de $\Gamma_{S_1}(0)$ ou $\Gamma_{S_2}(0)$. Il n'en est pas de même pour $\delta_{33}(\nu)$ dont l'effet est notable. Dans d'autres cas, comme celui de *Myotis austriacus* (12) il faudrait tenir compte d'une telle interaction.

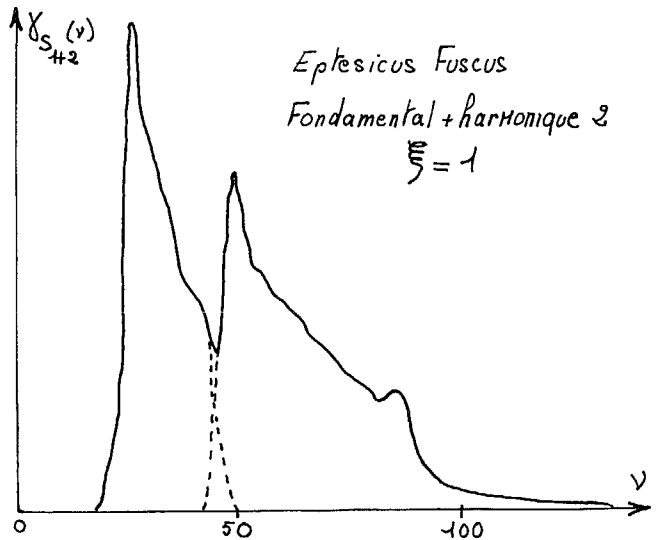


FIGURE 7

Nous constatons qu'en pratique, les chauve-souris augmentent le taux d'harmonique en passant du signal de veille, ou du signal de télémétrie simple, au signal de télémétrie différentielle ou



d'identification et de reconnaissance des cibles comme le montre la figure 8.

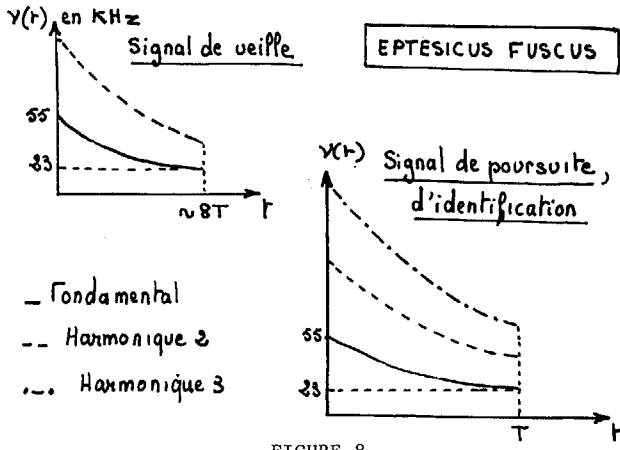


FIGURE 8

3. RESOLUTION ANGULAIRE ET EMISSION D'HARMONIQUES

a) Hypothèse de travail et formulation du problème

Des travaux précédents avaient montré que l'hypothèse d'un traitement cohérent par le récepteur de l'animal était plus que vraisemblable(3). Nous venons de voir que ce type de traitement pouvait permettre deux genres d'estimation en distance. Ceci nous conduit à développer l'étude d'un modèle de récepteur cohérent lors de l'estimation angulaire par l'animal.

Le modèle choisi est représenté figure 9.

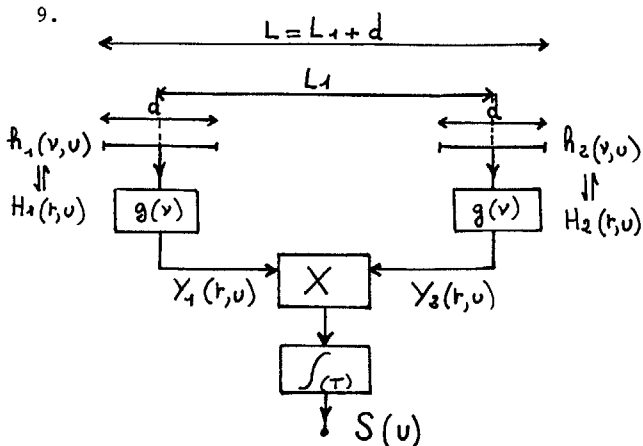


FIGURE 9

C'est un "interféromètre à corrélation" traitant les signaux reçus par deux antennes distantes de L_1 de dimension d , et de fonction d'illumination $e(x, y, \nu)$ quelconque. En appelant ν la fréquence spatiale $\frac{\sin \alpha}{c}$ la sortie du traitement spatiotemporel s'écrit :

$$S(\nu) = \int_R h_1^*(\nu, \nu) h_2(\nu, \nu) g_1^*(\nu) g_2(\nu) e^{-2\pi i \nu (L \cdot d)} Y_s(\nu) d\nu$$

avec h_1 et h_2 gain complexe spatiotemporels des deux antennes de réception. Si nous supposons que les deux pavillons formant les antennes réceptrices

sont à illumination constante (en l'absence d'informations plus précises) il vient :

$$S(\nu) = |g(\nu_c)|^2 k^2 \int_R \left(\frac{\sin \pi \nu d}{\pi \nu d} \right)^2 \cos[2\pi \nu (L \cdot d)] \delta s(\nu) d\nu$$

Nous avons choisi de traiter le cas du signal de veille émis par Vampyrum Spectrum, puisque l'émission se fait avec des bandes harmoniques disjointes (3) (11). Dans ce cas, en remarquant que le produit BT du fondamental ($BT = 72$) et des harmoniques sont grands devant l'unité, il vient :

$$Y_{S_k}(\nu) = P_k \frac{k}{16a} \frac{1}{\nu^2} \frac{\pi}{Bk} \frac{B_k}{\nu_c k} \text{ bande occupée } \frac{1}{\nu_c k} \text{ fréquence centrale de la bande}$$

P_k pondération de la bande considérée.

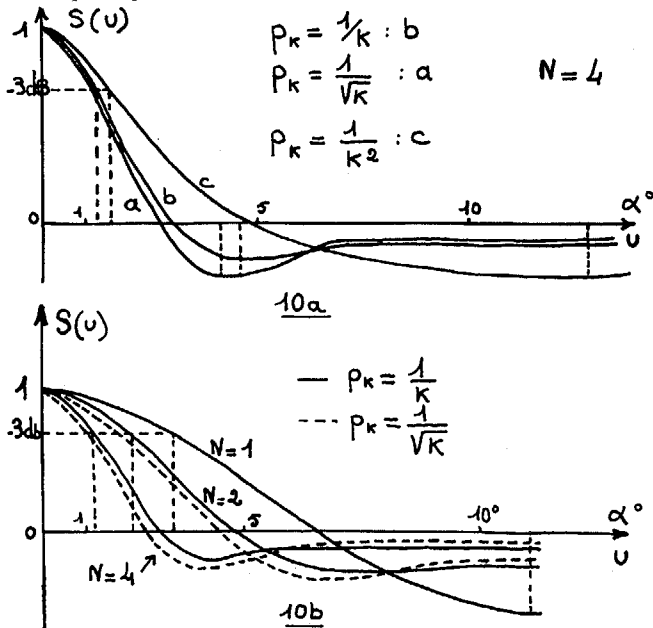
Divers calculs ont été effectués avec les pondérations P_k suivantes :

effectués avec les pondérations P_k suivantes :

$$P_k = \frac{1}{\sqrt{k}}, \frac{1}{k}, \frac{1}{k^2} \text{ et pour } 1 \leq k \leq N=4$$

Les résultats sont présentés figure 10 a et 10 b.

La "largeur du lobe central", calculée à -3 dB pour l'émission de 4 harmoniques, est diminuée par un facteur de l'ordre 3 par rapport à l'émission du seul fondamental. De plus la hauteur du 1er lobe latéral, correspondant à $N = 4$, se réduit dans un rapport deux par rapport au cas $N = 1$. La pondération en $\frac{1}{\sqrt{k}}$ ou $\frac{1}{k}$ change peu l'abscisse du premier zéro de $S_N(\nu)$, tandis que la pondération en $\frac{1}{k^2}$ le multiplie par un facteur de l'ordre de 2.



Figures 10a et 10b

Cette première étude montre tout l'intérêt de l'émission d'harmoniques en vue d'élargir la bande spectrale utile et partant, de réduire le "lobe central" de la réponse de l'interféromètre à corrélation. Ceci améliore la résolution angulaire. Diverses études en cours tendent à vérifier ces



PERFORMANCES DE CERTAINS SIGNAUX SONAR ANIMAUX A MODULATION HOMOGRAPHIQUE
EN PRESENCE D'HARMONIQUES

résultats sur les animaux et à tenir compte des recouvrements spectraux de certains harmoniques.

CONCLUSION

L'emploi par les chauve-souris de signaux SONAR à grand produit BT et à modulation homographique en fréquence, leur permet :

- d'obtenir une bonne tolérance à l'effet DOPPLER même sur des signaux de durée grande, à la différence d'autres modulations,

- d'éliminer l'erreur de biais d'estimation en distance, en augmentant la bande spectrale et en réduisant la durée,

- de limiter les pertes de performances en utilisant des modulations de fréquence forte ($\alpha \approx 3$).

L'émission de signaux harmoniques fournit des performances de "résolution fine" en distance excellente (de l'ordre de 0,5 mm) et permet une amélioration de la résolution angulaire sous l'hypothèse d'un traitement spatiotemporel cohérent.

REMERCIEMENTS

Ces études poursuivies depuis plusieurs années, le sont avec le concours de la DRME que nous tenons à remercier pour l'aide apportée. L'intérêt scientifique que nous a manifesté M. MERMOZ nous fut des plus précieux et nous l'en remercions. M. HOLLINGER a droit à nos remerciements pour son aide lors de nombreux calculs d'une grande complexité.

BIBLIOGRAPHIE

- | | |
|--|--|
| 9 - A.W. RIHAZECK | IEEE Trans. Inf. Th. Vol. IT 14 N° 3 1968 |
| 10 - A. DZIEDZIC
B. ESCUDIE
A. HELLION | Colloque Gretszi 1971 |
| 11 - J.W. BRADBURY | Journ. Exp. Zool. Vol. 173 p. 23-46 Janv. 1970 |
| 12 - N. SUGA et al. | J. Acoust. Soc. Am. Vol. 54 N°3 p. 793-797 1973 |
| 13 - J.A. SIMMONS | J. Acoust. Soc. Am. Vol. 54 N°1 p; 157-173 1973 |
| 14 - H.L. VAN TREES | Detection Estimation and Modulation Theory 1968
Wiley Tome 1 |
| 15 - P.M. WOODWARD | Probability and Information Theory Pergamon Press Ed. 1953 |
| 1 - J. A. SIMMONS | Science Vol.186 p. 1130-1132 20/12 1974 |
| 2 - A. DZIEDZIC
et al | C. R. Ac. Sc. Paris t. 279 Série D p. 1313-1316 7/10 1974 |
| 3 - A. HELLION
B. ESCUDIE | Colloque GRETSI Nice t. 1 p. 549-584 1973 |
| 4 - D. CAHLANDER | Animal Sonar Systems R.G. BUSNEL Edit. t. 2 p; 1052-1081 1967 |
| 5 - R. SUTHERS | Journal Exp. Zool. vol. 158 N°3 p. 319-347 Avril 1965 |
| 6 - R.A. ALTES | Methods of Wideband Signals design for Radar and SONAR Systems Thèse Univ. Rochester (USA)1971 |
| 7 - B. HARRIS
S.A. KRÄMER | Proc. IEEE Vol. 56 N°12 p. 2149 et suiv. 1968 |
| 8 - B. ESCUDIE
A. DZIEDZIC
G. BARREAUULT | Rev. d'Acoustique Vol. 5 N°18 1972 |