

NEUVIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 16 au 20 MAI 1983

AMBIGUITE COMPRESSION DES SIGNAUX SONAR DES CHAUVES-SOURIS LORS DE LA
POURSUITE D'UNE PROIE EN MILIEU NATUREL

LIN Zhen Biao (*) M. MAMODE (**) Bernard ESCUDIE (***)

(*) Institut Technologique de la Chine (**) Université de la Réunion B.P.5 (***) Laboratoire Traitement du Signal
du sud - Canton - CHINE 97490 - Ste CLOTILDE - LA REUNION ICPI 25 rue du Plat-Lyon - FRANCE

RESUME

On étudie une série de 50 signaux SONAR émis par une chauve-souris *Myotis mystacinus*, lors de la détection, de l'identification et de la capture d'un insecte sur un site forestier.

L'étude caractérise les fonctions d'Ambiguïté compression des signaux à l'aide de leur trace principale et d'une représentation en courbe de niveau. Les signaux sont décrits par leurs amplitudes et fréquences instantanées et diverses grandeurs énergétiques en représentation fréquentielle.

Les signaux de veille ne possèdent pas une bonne tolérance à l'effet DOPPLER. Ils comportent une composante à fréquence pure permettant la détection des cibles mobiles. Les phases d'identification et de poursuite font apparaître des signaux plus performants ayant un biais d'estimation faible. Les signaux de poursuite possèdent une forte résolution en distance même à effet DOPPLER important. La composante à fréquence pure tend à disparaître au profit d'une modulation de fréquence décroissante hyperbolique. Certains des signaux de poursuite possèdent la propriété de tolérance à l'accélération permettant une estimation non biaisée de la position.

Les signaux émis dans la phase de capture laissent apparaître une structure de signal à produit durée bande faible, et une composante harmonique d'ordre deux importante. Ils semblent liés à une forte augmentation du pouvoir de résolution angulaire.

SUMMARY

During detection, identification and capture of insects by a bat (*Myotis mystacinus*) 50 SONAR signals were recorded.

These signals are analyzed using the wideband Ambiguity function. The main ridge of the Ambiguity surface, represented by contour graphs, describes the performances of the recorded signals. Various parameters of signals are studied such as instantaneous amplitude and frequency, and frequency representations.

The cruise signals emitted during the detection phase are not true DOPPLER Tolerant Signals. They may be described as constant frequency (CF) and frequency modulated ones (FM). The CF part is used to detect the moving targets. During identification and pursuit the bat emits high performances signals the range bias of which is very low. Pursuit signals exhibits a fairly good range resolution even at high DOPPLER values. The CF part is decreasing and the signals becomes FM with hyperbolic frequency law.

Any signals exhibits acceleration tolerance properties related to optimum estimation of range in presence or range and speed rate.

During capture the bat emits signals with low duration bandwidth product and an important second order harmonic component. Such signals exhibits a wide frequency bandwidth, which can be related to an increase of angle resolution. Such a feature is related the cross correlation structure of the interferometric receiver used by bats to get bearing informations.



1) Conditions d'observation des signaux SONAR :

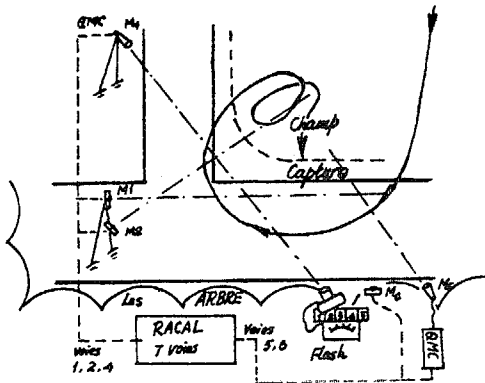


figure 1

La figure 1 décrit le système d'observation acoustique formé de 5 microphones et d'un appareil photo couplé à un flash électronique. La bande passante utile des capteurs acoustiques et de l'enregistreur est de 120 KHz. Les enregistrements furent réalisés le 25 juin 1982 entre 22 et 23 h au parc ornithologique de VILLARS-les Dombes (Ain).

2) Fonction d'Ambiguïté et performances SONAR :

Les études menées depuis 1970 montrent que le système SONAR des Chiroptères se modélise par un récepteur à corrélation ou filtre adapté [1][2][3]. La fonction d'Ambiguïté en compression $\chi_s(\tau, \eta)$ [4][5]:

$$\chi_s(\tau, \eta) = \sqrt{\eta} \int_R S(t) S^*(\eta(t-\tau)) dt, S \in \mathbb{R}$$

décrit la sortie du filtre adapté à S excité par l'écho $S(\eta(t-\tau))$ dû à un réflecteur de vitesse radiale V : $\eta = \frac{1-V/c_0}{1+V/c_0}$, c_0 vitesse de groupe de l'onde dans le milieu. Soit Z(t), signal analytique associé à S, χ_z la fonction d'Ambiguïté [6][5]:

$$\chi_z(\tau, \eta) = \sqrt{\eta} \int_R Z(t) Z^*(\eta(t-\tau)) dt = \int_R z(\nu) z^*(\nu) e^{2i\pi\nu\tau} \frac{d\nu}{\eta}$$

$Z(t) \doteq z(\nu)$. χ_z traduit en sortie le contraste "signal à bruit" et la statistique des estimations de distance et vitesse, sous l'hypothèse de signal fort [6] : $(E_s/\sigma_0) \gg 1$, σ_0 densité spectrale du bruit constante dans la bande du signal [7].

Les signaux sont supposés de type asymptotique ($BT \gg 1$) tels que leur signal analytique Z(t) soit représenté de manière satisfaisante par le modèle exponentiel : $Z = A(t) e^{i\Phi(t)}$, $S(t) = A(t) \times \cos \Phi(t)$. Le bruit est supposé de densité de probabilité gaussienne et additif.

3) Evolution des paramètres temporels des signaux SONAR durant la poursuite :

La chauve-souris se rapproche du micro MS passant de la veille (détection, estimation de distance) à l'identification de la cible (insecte) puis à la capture de celle-ci (figure 1). La figure 2 représente la durée T, la période de répétition T_r , l'énergie E_s des signaux. La phase d'identification débute en S_{13} où la période T_r diminue rapidement ($S_{13}-S_{20}$). L'énergie E_s diminue avec la distance entre la Chauve-souris et la proie ($S_{23}-S_{38}$). La durée T est divisée par 2, 3 tandis que E_s diminue par 6 dans le même temps. Durant la capture la période T_r est constante, soit une distance maximale d'observation D_M , 0,8 m. La durée T atteint une valeur minimale de l'ordre de 320 μs .

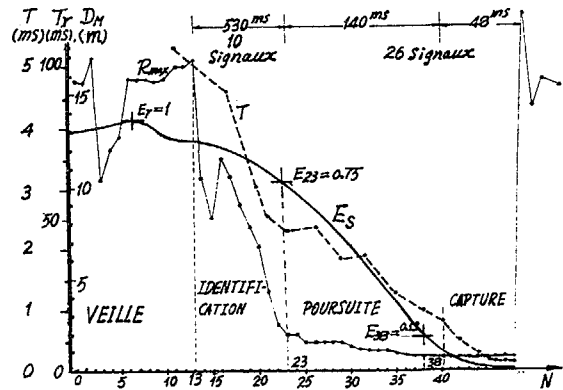


figure 2

4) Caractéristiques spectrales des signaux émis :

Les signaux enregistrés sont traités par transformation de FOURIER :

$$S_k(t) \doteq \rho_k(\nu), \sigma_k(\nu) = |\rho_k(\nu)|^2 \doteq S_k(\nu)$$

La figure 3 présente les définitions de la bande B, de la fréquence centrale ν_c et du paramètre $k_{\pi} = B \cdot \nu_c^{-1}$. Il caractérise la densité $\sigma_s(\nu)$, si $k_{\pi} \approx \frac{1}{10}$ il y a un "pic" centré à la fréquence ν_m par exemple.

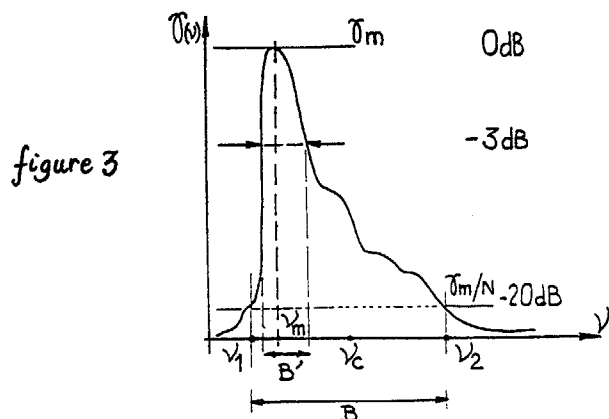


figure 3

AMBIGUÏTÉ COMPRESSION DES SIGNAUX SONAR DES CHAUVÉ-SOURIS LORS DE LA POURSUITE D'UNE PROIE EN MILIEU NATUREL

La figure 4 décrit les paramètres spectraux. La bande B augmente à partir de S_{17} . La résolution en distance $\tau_0 = (1/B)$ diminue, indiquant le début d'une phase d'identification de la cible, où la fréquence ν_m augmente.

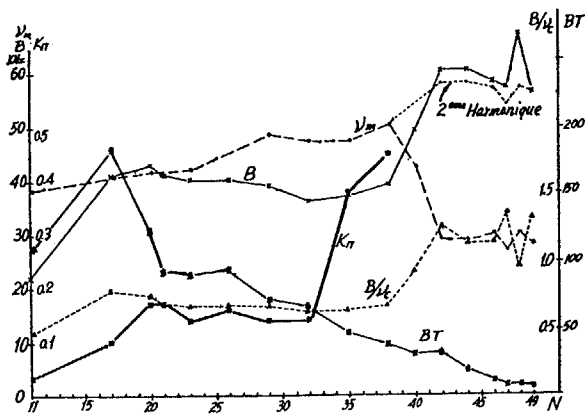


figure 4

La bande B est constante jusqu'à S_{38} . Dans la phase de capture ($S_{39}-S_{49}$) la bande B augmente très fortement avec l'apparition de composantes harmoniques ($S_{39}-S_{49}$). L'extension de la bande B à partir de S_{31} se manifeste par une variation de k_{π} atteignant des valeurs de 0,3 à 0,5. Le rapport (B/ν_c) de valeur faible (1/3) augmente et reste constant de S_{20} à S_{35} (0,6) pour atteindre la valeur 1,4. Le produit bande durée BT diminue de S_{11} à S_{40} passant de 200 à 40. Le caractère asymptotique est donc admissible [8].

5) Modulations de fréquence et d'amplitude des signaux observés :

a - procédé de démodulation

Ayant calculé $Z(t)$ associé à $S(t)$ par la relation : $Z(t) \Leftrightarrow z(\nu) = 2A(\nu) \cdot U(\nu) = 2A, \nu \geq 0$ on détermine $A(t) = |Z(t)|$ et $\nu_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d \text{Arg} Z}{dt}$. Ce résultat est vérifié par démodulation d'amplitude (redressement filtrage) et par mesure de $\theta_i(t)$, période instantanée, calculée entre 2 passages à zéro successifs. La figure 5a illustre ce procédé. L'analyse en temps et fréquence par transformation de FOURIER-FRESNEL fournit une confirmation des résultats [9]. Les signaux S_{39} à S_{49} comportant des harmoniques, $\nu_i(t)$ n'est pas calculable par le procédé précédent. On utilise le fait que : $\tau_g = -\frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi}{d\nu}$, $z = |z| e^{i\varphi(\nu)}$. Pour la composante harmonique d'ordre 1, le produit BT est de l'ordre de 15 au minimum assurant le caractère asymptotique. Ceci permet la transformation :
$$\begin{cases} t = \tau_g(\nu_i(t)) \\ \nu = \nu_i(\tau_g(\nu)) \end{cases}$$

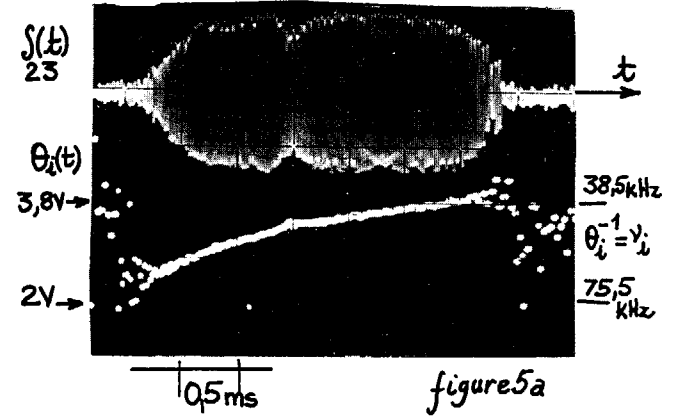


figure 5a

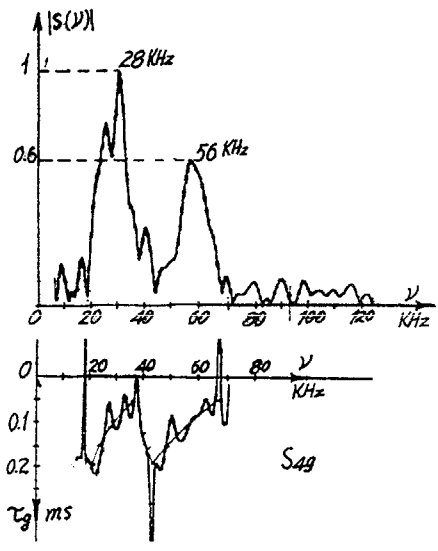


figure 5b

Le procédé est correct car pour tout $\nu \geq 0$ il y a 1 détermination et une seule pour τ_g (cf fig. 5b).

b - évolution des lois de fréquence instantanée

La figure 6 présente les fréquences instantanées $\nu_k(t)$. Pour S_{11} (veille) on peut écrire : $\nu_{11}(t) = \nu_0(1+a(t-t_0))^{-1} + \nu_1$, $\nu_{11}(t)$ est presque constante sur les 2/3 de la durée T_{11} . La pente $|(d\nu_k/dt)|_{t_0}$ à l'origine augmente avec l'indice k passant de 30 à 200 kHz^2 (S_{11} à S_{38}). La bande de modulation $\nu_k(t_0) - \nu_k(t_0+T)$ augmente et la partie à fréquence pure disparaît en S_{21} . A partir de S_{35} , $\nu_k(t)$ devient homographique. $A_{29}(t)$ présente 2 maxima presque égaux à la différence des enveloppes précédentes. Le facteur $\lambda = BT((\frac{\nu_c}{B})^2 - \frac{1}{4})$, $\lambda = \nu_0 \cdot a^{-1}$ est tel que $20 \leq \lambda \leq 600$ assurant le caractère asymptotique des signaux de ce type. [8] [10].

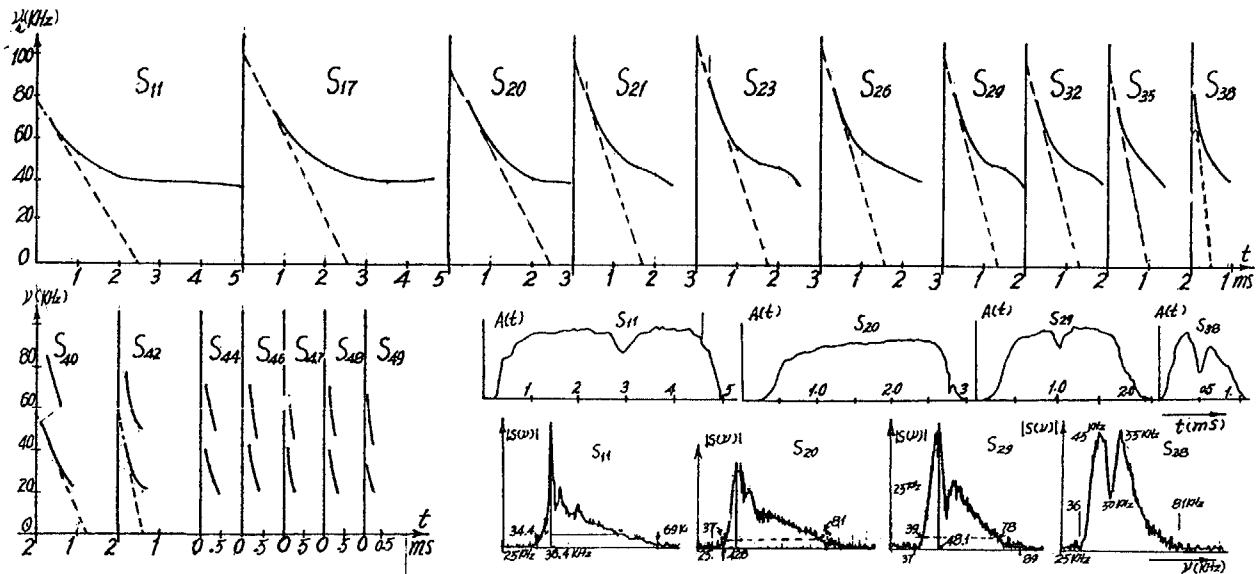


figure 6

6) Surfaces d'Ambiguïté des Signaux SONAR

La surface d'Ambiguïté $|\chi_z(\tau, \eta)|$ correspond à l'enveloppe de $\chi_s(\tau, \eta)$. On étudie en outre deux sections $\chi_s(\tau, 1) = \sqrt{S(\tau)}$ pour S_{11} et S_{49} .

a - Cas du signal de veille S_{11}

La figure 7a présente $|\chi_{z_{M1}}|$ la fonction d'autocorrélation $\sqrt{S_{M1}(\tau)}$. La densité interspectrale DOPPLER est représentée à la figure 7b :

$$\sqrt{S(\tau)} \delta_z(\nu, \eta) = \eta^{-1/2} \delta(\nu) \delta^*(\nu/\eta) U(\nu) \Leftrightarrow \chi_z(\tau, \eta)$$

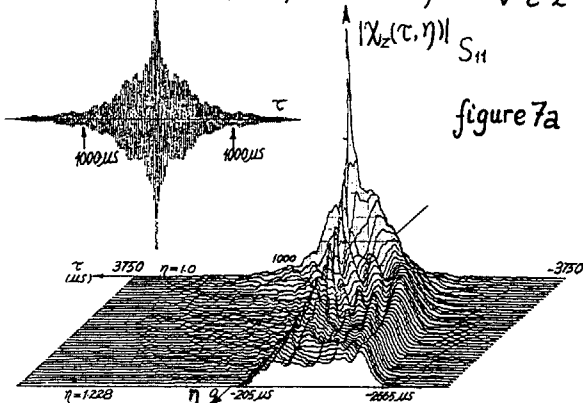


figure 7a

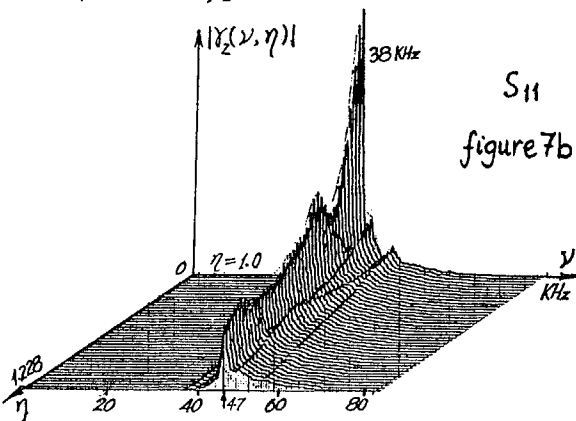


figure 7b

Des signaux de veille analogues à S_{11} (voir figure 6) souvent rencontrés dans diverses études [1]. L'arête de la surface $|\chi_{z_{M1}}|$ décroît rapidement au long de la trace $\tau_m(\eta)$ (figures 12 et 13) ; un tel signal n'est pas "DOPPLER tolérant" pour la détection. On appelle "vitesse limite tolérée" la valeur maximale η_0 telle que :

$$|\chi_z(\tau, \eta_0)|^2 = \frac{1}{2} \chi_z^2(0, 1)$$

$$\eta_0 \rightarrow v_0 = 1,4 \text{ m/s}$$

comme la figure 11 le montre. Un signal de fréquence $\nu_m = 38 \text{ kHz}$ aurait la même performance pour une durée $T_0 = 3,6 \text{ ms}$. La résolution en distance τ_0 est définie pour $v = 0 \text{ m/s}$ par l'épanouissement de la courbe χ_z : $|\chi_z|^2 = 1/2$, $\tau_0 = 50 \mu\text{s}$, $r_0 = 8,3 \text{ mm}$. Si $v = 10 \text{ m/s}$ la résolution τ_0 est de 1,7 ms soit

$$r_0 \approx 0,27 \text{ m. Or [12] : } \chi_z(\tau, \eta) \Leftrightarrow |\delta_z(\nu, \eta)| e^{-i 2\pi \int_R (\tau_g(\nu) - \eta \tau_g(\nu/\eta)) d\nu}$$

Si η augmente : $\tau_e(\eta) = \int_R \tau^2 |\chi_z|^2 d\tau$ augmente créant une perte de résolution. La partie à fréquence pure sert à détecter les cibles mobiles dans la réverbération, la partie à fréquence modulée permet une estimation de distance précise.

AMBIGUITE COMPRESSION DES SIGNAUX SONAR DES CHAUVÉ-SOURIS LORS DE LA POURSUITE D'UNE PROIE EN MILIEU NATUREL

b - tolérance à l'effet DOPPLER et résolution en distance des signaux de poursuite

Les figures 8, 9, 10 représentent $|\chi_z|$ pour S_{20} , S_{23} , S_{38} , S_{49} . Les courbes de niveau $|\chi_z|^2 = \frac{1}{2} \chi_z^2(0,1)$ montrent que la vitesse limite tolérée est $V_0 = 3m/s$, $11m/s$ (cf figure 11). Cette espèce de chauve-souris atteint rarement de telles vitesses. La résolution en distance τ_0 a la même valeur pour S_{23} et S_{38} : $\tau_0 = 33 \mu s$, $r_0 \approx 5,5 mm$. La bande B restant constante jusqu'à S_{39} , $A_k(t)$ fait apparaître 2 maxima quasi égaux, avantagant les hautes fréquences : B augmente et τ_0 décroît. L'émission de composantes harmoniques augmente fortement B (cf figure 6). D'après J.A.SIMMONS la résolution en distance et angle des signaux de poursuite et capture est liée à la largeur du pic central de $\sqrt{g}(\tau)$ [1]. Pour S_{49} : $\tau_0 \approx 12,5 \mu s$, $r_0 \approx 2 mm$. En notant que $\chi_z(\tau, \eta)$ s'exprime à l'aide de $|\chi_z(v, \eta)|$ et sous l'hypothèse $\tau_g(v) = -\frac{v}{c}$ (signal asymptotique à modulation hyperbolique en fréquence) on a : [12]

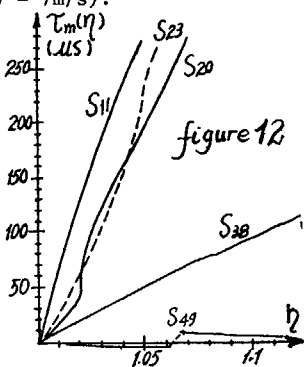
$$\chi_z(\tau, \eta) = |\chi_z(v, \eta)| = \chi_w(v)$$

$$\text{et : } \tau_0(\eta) \approx \tau_0(1) = B_e^{-1}, B_e = \int_R (v-v_g)^2 |g|^2 dv, v_g = \int_R v |g|^2 dv$$

$\langle g, g \rangle = 1$

Ceci explique que τ_0 diminue fortement avec l'augmentation de B_e durant la capture. D'après la figure 12 la trace τ_m est telle que $\tau_m \approx 0$ pour S_{49} , à la différence de S_{11} et S_{23} (veille, localisation). Durant la poursuite la perte de performances : (figure 13) $\text{Max}_{-\infty < \tau < +\infty} |\chi_z(\tau, \eta)| = |\chi_z(\tau_m, \eta)|$

est très faible puisque $\eta = 1,04$, $|\chi_z(\tau_m, \eta)| \approx 0,87$ ($v = 7m/s$).



Le rapport $\left[\frac{\tau_0(1,06)}{\tau_0(1)} \right]$ diminue de 5, pour $v = 10m/s$ en S_{23} , à 1,3 pour S_{38} . La tolérance à l'effet DOPPLER augmente. La figure 12 représente le biais d'estimation en distance $\tau_m(\eta)$. De S_{23} à S_{38} , τ_m décroît par un facteur 4, et de S_{38} à S_{49} , τ_m varie d'un facteur 5. Le centre de découplage des estimations de distance et vitesse défini par M. MAMODE est : [6]

$$\theta_d = -\frac{\delta_0}{\lambda_0} \approx \frac{\tau_m(\eta)}{1-\eta}, \eta = 1 - \epsilon \approx 1$$

Lors de la poursuite θ_d décroît de 3 ms (S_{28}) à 0,12 ms (S_{39}).

Signaux Paramètres	Veille S_{11}	Identifi- cation S_{23}	Poursuite S_{38}	Capture S_{49}
Vitesse limite tolérée: m/s	1.4	3	11	9
$\tau_m(\eta)$: μs ($v = 7 m/s$)	240	160	40	-4.3
θ_d : ms	5.4	3	1.1	-0.12
Résolution en distance mm	$v = 0$	8.3	5.4	5.4
	$v = 10 m/s$	270	25	7

c - tolérance à l'accélération

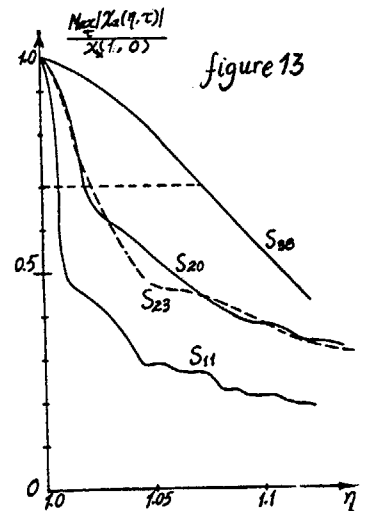
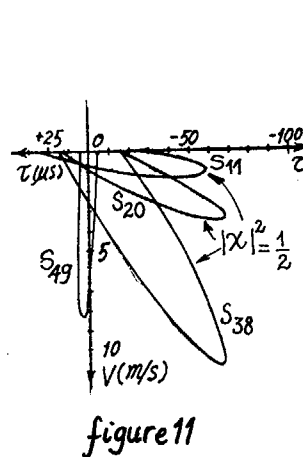
M.MAMODE définit la fonction d'Ambiguïté généralisée, qui pour l'accélération constante s'écrit :

$$[6] \chi_z(\tau, \eta, \alpha) = \int_R z(t-\tau) z^*(t-\tau_0)(\eta - \alpha(t-\tau_0)) dt \rightarrow \chi_z(\tau, \eta)_{\alpha=0}$$

$\alpha = k_r v_c$, v_c accélération radiale

Ayant défini $\theta_d = -\delta_0 \lambda_0^{-2}$, l'emploi de $Z' = Z(t-\theta_d)$ permet l'estimation non biaisée de la distance et fournit des erreurs décorrélées [6]. De même pour $\alpha \neq 0$, la trace $\tau_m(\eta, \alpha)$ de $|\chi|^2$ est telle qu'il n'y a aucun biais si : $\delta_1 = \theta_d \delta_0$, $\delta_1 = -\int_R t^2 |z|^2 dt + \frac{E_z}{2} - \text{Re}\{\bar{z}\}$
 $\gamma = \int z^* z dt \int t^2 z z^* dt, Z = A e^{i\Phi}, \dot{\Phi} = 2\pi v_c(t)$
 Pour S_{23} : $\delta_0 = -5,6 \cdot 10^5 \text{ kHz}$, $\delta_1 = -2,11 \cdot 10^6$
 $\lambda^2 = 1,45 \cdot 10^5 \text{ kHz}^2$, $\theta_d = 3,7 \text{ ms}$, $\delta_1 = -2,110^6 \approx -1,92 \cdot 10^6 = \theta_d \cdot \delta_0$

Vu la précision des calculs portant sur $A(t)$ et $\Phi(t)$ il est plausible d'admettre l'égalité. S_{23} remplit la condition d'estimation non biaisée, ce qui paraît vraisemblable dans une phase de poursuite.





AMBIGUITE COMPRESSION DES SIGNAUX SONAR DES CHAUVES-SOURIS LORS DE LA POURSUITE D'UNE PROIE EN MILIEU NATUREL

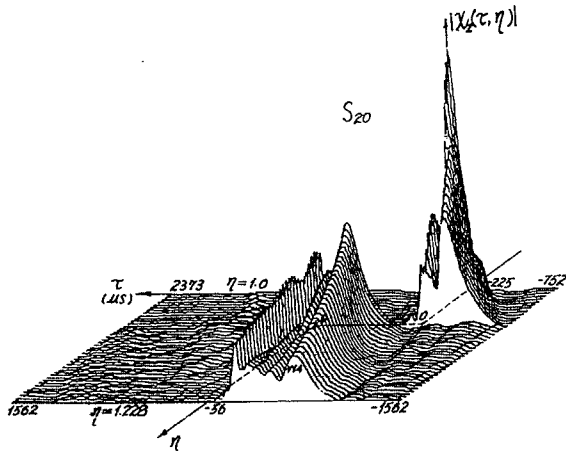


figure 8a

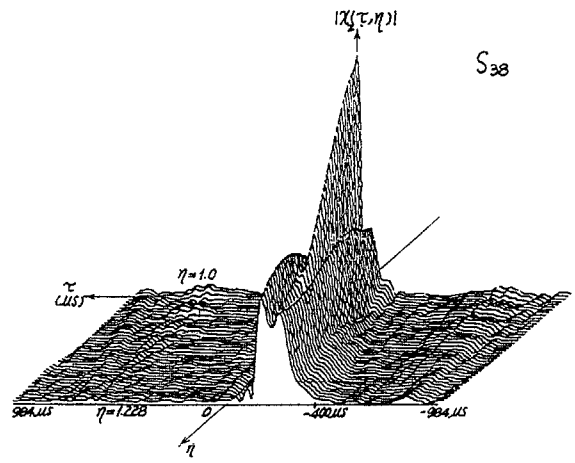


figure 9

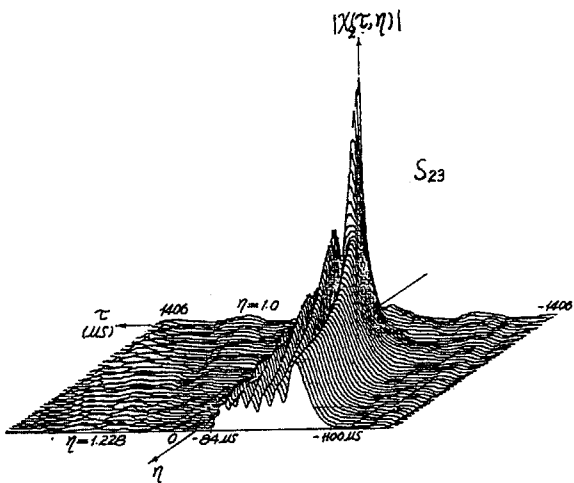


figure 8b

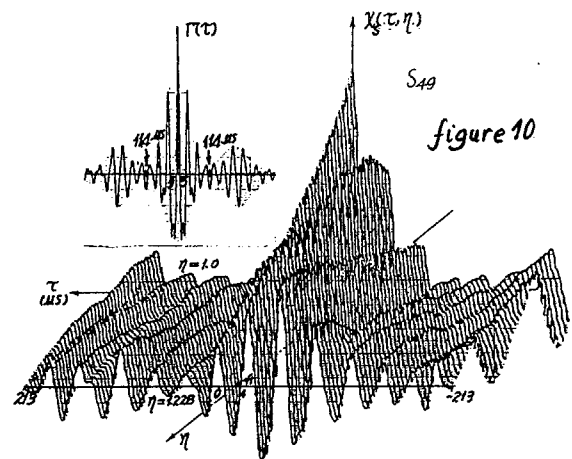


figure 10

d - estimation angulaire

J.A. SIMMONS et C. BARD ont montré que le système d'estimation angulaire des chauve-souris peut être représenté par un récepteur interférométrique [13] [14]. La réponse angulaire d'un tel dispositif, décrit figure 14, dépend de l'étendue spectrale relative (B/ν_c) , et du taux de remplissage spatial

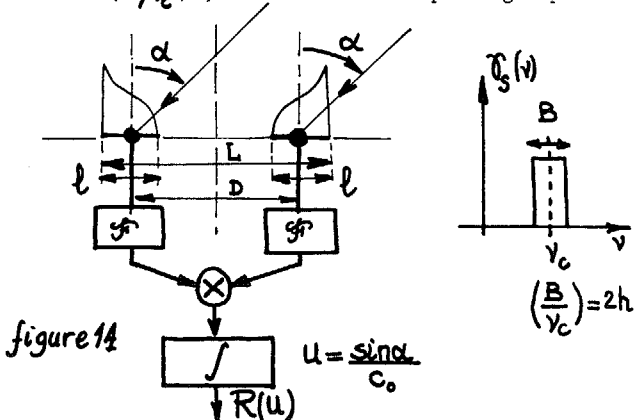


figure 14

des 2 pavillons de réception. Pour *Myotis mystacinus* les paramètres sont tels que: $(2l/L) \approx 0.50$ et dans le cas d'un signal de veille avec $h = 0,5$ [14] le pouvoir de résolution lié au premier zéro de la réponse angulaire est de l'ordre de $310^{-2} \text{rd} \approx 4^\circ$. Cette quantité diminue par un facteur 2 ou plus lors de l'émission d'harmoniques comme C.BARD l'a montré [14].

CONCLUSION

Les paramètres spectraux $(B, B/\nu_c, \dots)$ et de modulation $A(t), \nu_i(t)$ ne permettent pas de déduire commodément les performances d'estimation des signaux SONAR des Chauves-Souris. L'étude de leurs fonctions d'Ambiguïté compression fournit aisément les grandeurs liées à la tolérance à l'effet DOPPLER, à la résolution en distance et vitesse, au biais d'estimation et à la date de découplage. L'évolution des signaux SONARS émis par une chauve-souris (*Myotis mystacinus*), depuis la détection jusqu'à la capture de la proie, fait apparaître un souci de localisation en position de la cible, de discrimination en vitesse, ...

AMBIGUITE COMPRESSION DES SIGNAUX SONAR DES CHAUVES-SOURIS LORS DE LA
POURSUITE D'UNE PROIE EN MILIEU NATUREL

... puis une tendance à une estimation plus fine en distance tolérant mieux l'effet DOPPLER au cours de la poursuite et de la capture. Dans cette dernière phase l'émission à large bande due à des harmoniques de rang 2 permet une localisation et une description plus fine de l'objet poursuivi, tout en améliorant la résolution angulaire.

Remerciements

Ce travail fut effectué dans le cadre de la RCP 445 CNRS. Les auteurs tiennent à remercier les participants de cette formation pour leur aide et plus spécialement Y.TUPINIER, P. FLANDRIN, et Y.BIRAUD.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J.A.SIMMONS Journ. Comp. Physiol. A vol 135
p.61-84 1980
- [2] J.A.SIMMONS Animal Sonar Systems p.715 et suiv.
plenum Press 1980
- [3] D.A. CAHLANDER Animal Sonar Systems Tome II
p.1052.1081 R.G.BUSNEL Ed 1967
- [4] M. CHIOLLAZ Thèse doct. ing.INP.Grenoble Univ.
Grenoble Oct.1979
- [5] R.A. ALTES Phys. Doct.Univ. Rochester (N.Y)USA 1970
- [6] M.MAMODE Thèse doct.ing.INP.Grenoble Univ.
Grenoble Mai 1981
- [7] M.MAMODE B.ESCUDIE 7ème colloque Gretsni Nice 1979
- [8] P.FLANDRIN B.ESCUDIE 8ème colloque Gretsni Nice
1981
- [9] P.FLANDRIN et al.à paraitre et Rapport interne
ICPI TS 1982
- [10] P.FLANDRIN Rapport DEA INP Grenoble (rapport
ICPI TS interne)1980
- [11] Y.TUPINIER et al.Intern. Bat.conf.(FIBRC
Meeting) Albuquerque (N.M) USA août 1978
- [12] LIN Z.B. article soumis à Signal Processing
Rapport ICPI TS 83 1983
- [13] C.BARD 6ième colloque Gretsni Nice 1977
- [14] C.BARD Thèse doct.ing. INP Grenoble Univ.
Grenoble 1976

