

POURSUITE D'ÉCARTS DE TEMPS PAR INTÉGRATION TEMPS-ÉCHELLE ET HMM

S. Sitbon, P. Blanc-Benon et Y. Chocheyras

THOMSON-SINTRA ASM, BP.157, 06903 SOPHIA-ANTIPOLIS CEDEX, FRANCE

RÉSUMÉ

La détection et la poursuite de cibles manoeuvrantes en sortie d'intercorrélateurs en réseau, est un compromis délicat autour d'une intégration suffisante pour détecter mais assez courte pour suivre les évolutions de la cible. Les deux approches nouvelles proposées reposent sur un principe de détection et poursuite simultanées: l'intégration linéaire à long-terme, ou l'intégration dynamique par modèle stochastique (chaines de Markov cachées HMM). L'intégration long-terme linéaire améliore les performances de l'intercorrélation classique. La seconde approche (HMM) est plus puissante dans le cas où la géométrie source/réseau se déforme rapidement (Doppler différentiel non constant). Le gain obtenu par simulation de Monte-Carlo sur la détection-poursuite simple est de l'ordre de 2 à 5 dB pour une probabilité de détection de 0.5. Des résultats à la mer montrent le meilleur comportement de ces deux méthodes par rapport à l'approche classique.

1. INTRODUCTION

L'exploitation de plateformes passives hétérogènes pour localiser rapidement des sources en mouvement nécessite de détecter conjointement les sources sur les deux antennes. On doit ainsi associer les mesures (azimuts) issues des deux antennes avant de chercher à trajectographier les sources. L'association de pistes de mesures propres à chaque antenne peut être menée à bien soit par manoeuvre des plateformes, soit par détection cohérente. Dans ce dernier cas, on exploite la cohérence des signaux reçus sur les antennes pour décider d'associer les pistes de mesures. Des méthodes partiellement cohérentes opérant par comparaison de signatures acoustiques peuvent de plus être exploitées.

Nous examinons ici les moyens de réaliser la détection cohérente et la poursuite de sources grâce à des mesures d'intercorrélation [1]-[4]. L'intégration temps-échelle d'intercorrélation court-terme s'applique uniquement dans le cas où la variation de l'écart de temps inter-antenne varie linéairement en fonction du temps. Lorsque la géométrie source-antenne se déforme rapidement dans le cas de manoeuvres brutales, ce traitement subit une perte de détection qui rend délicate la poursuite. Pour éviter d'augmenter l'ordre du modèle déterministe à prendre en compte, le problème posé conduit naturellement à examiner des techniques de type intégration dynamique stochastique (HMM). Nous allons donc ici, successivement rappeler le principe et les caractéristiques de l'intégration temps-échelle et des poursuites de type HMM puis les performances de ces deux méthodes seront comparés grâce à des simulations et sur des signaux réels sonar.

2. INTÉGRATION TEMPS-ÉCHELLE

Lorsque l'on cherche à détecter une source large bande en mouvement, la non stationnarité conjointe des signaux reçus sur deux capteurs ou antennes éloignés, limite les performances de détection et d'estimation de l'écart de temps associé. Le détecteur adapté à cette situation consiste à compenser le changement temporel d'échelle (compression ou expansion) avant de réaliser l'intercorrélation des signaux. Formellement on peut décrire de la façon suivante cette situation. Notons $x_A(t)$ et $x_B(t)$ les signaux reçus sur les deux antennes A et B, et $s(t)$ le

ABSTRACT

Tracking manoeuvring targets with a few sensors using correlation outputs balances between increasing the integration time to detect or reducing it to track. The new two methods here proposed are based on simultaneous detection and tracking: either long-term integration with a linear model for the time-delays, or dynamic integration with hidden Markov models (HMM). Firstly, we enhance the classical correlation with linear evolution of the manoeuvring target. Secondly, we address the stochastic evolution (Markov model) of the time-delay due to the fast manoeuvring targets. Finally Monte-Carlo simulations and at-sea signals demonstrate the efficiency of both methods against the classical approach: ROC curves exhibits a 2-5 dB gain for a 0.5 probability of detection.

signal rayonné par la source en mouvement reçu sur l'antenne A. On a alors:

$$\begin{aligned} x_A(t) &= s(t) + n_A(t) \\ x_B(t) &= s(t + \tau_{AB}(t)) + n_B(t) \end{aligned} \quad (1)$$

où $n_A(t)$ et $n_B(t)$ sont des bruits additifs indépendants et $\tau_{AB}(t)$ est le retard inter-antennes qui traduit la cinématique du problème. Pour la plupart des scénarios, on peut admettre la validité d'une expression linéaire en t autour de l'instant d'estimation:

$$\tau_{AB}(t_0 + t) \simeq \tau_{AB}(t_0) + t\dot{\tau}_{AB}(t_0) \quad t \in \left[-\frac{T}{2}, \frac{T}{2}\right] \quad (2)$$

où T est la durée d'observation. L'estimateur du maximum de vraisemblance des paramètres $\tau_{AB}(t_0)$ et $\dot{\tau}_{AB}(t_0)$ est réalisé par intercorrélation temps-échelle (compensée en Doppler différentiel [5]):

$$(\widehat{\tau}, \widehat{\dot{\tau}}) = \arg \max_{\tau, \dot{\tau}} C_{AB}(\tau, \dot{\tau}, t_0, T) \quad (3)$$

avec

$$C_{AB}(\tau, \dot{\tau}, t_0, T) = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x_A(t + t_0 + \tau + t\dot{\tau}) x_B(t + t_0) dt \quad (4)$$

Pratiquement cet estimateur peut être réalisé sous deux formes:

- Réalisation canonique par application d'un changement temporel d'échelle (compression ou expansion) avant intercorrélation classique: on fait un échantillonnage $(\Delta\tau, \Delta\dot{\tau})$ suivant la variable $\dot{\tau}$ de la surface $C_{AB}(\tau, \dot{\tau}, t_0, T)$ en calculant des coupes $C_{AB}^i(\tau, t_0, T)$ au moyen d'une interpolation temporelle du signal $x_A(t)$

$$x_A^i(t) = x_A(t + t_0 + i\Delta\dot{\tau}t) \quad t \in \left[-\frac{T}{2}, \frac{T}{2}\right] \quad (5)$$

$$C_{AB}^i(\tau, t_0, T) = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x_A^i(t + \tau) x_B(t + t_0) dt \quad (6)$$



Usuellement en sonar passif basse fréquence, le temps d'intégration cohérent T peut varier entre quelques secondes et quelques dizaines de secondes.

• Intégration temps-échelle.

L'intégration temps-échelle de sorties d'intercorrélacion court-terme suivant des chemins linéaires en τ , permet d'approximer la réalisation canonique:

$$D_{AB}^i(\tau, t_0, T) = \sum_{k=1}^K C_{AB} \left(\tau + i\Delta\tau \frac{T}{K}, t_0 + (k - \frac{K}{2}) \frac{T}{K}, \frac{T}{K} \right) \quad (7)$$

On montre [6],[7] que moyennant le respect de contraintes sur $\frac{T}{K}$ (durée d'intégration cohérente élémentaire) et sur la bande du signal

$$C_{AB}^i(\tau, t_0, T) \simeq D_{AB}^i(\tau, t_0, T) \quad (8)$$

L'intégration temps-échelle $D_{AB}^i(\tau, \dot{\tau}, t_0, T)$ qui découle des définitions précédentes présente, outre un gain en charge de calcul, l'avantage d'offrir une référence propre à permettre une comparaison directe avec l'intégration dynamique stochastique de type HMM: les données de base (intercorrélacion court-terme) sont identiques. En supposant la validité du modèle linéaire en τ , les performances de détection relatives à l'intégration temps-échelle trouvent leur expression par la relation P_D , P_{FA} suivante

$$P_D = \operatorname{erfc} \left(\operatorname{erfc}^{-1}(P_{FA}) - \sqrt{BT} \frac{S}{B} \right) \quad (9)$$

où $\frac{S}{B}$ est le rapport signal à bruit dans la bande de traitement B .

L'inconvénient de cette méthode de détection se manifeste lorsque la géométrie source-antennes se déforme rapidement suivant un modèle complexe: le modèle linéaire d'écart de temps n'est plus vérifié, et l'utilisation de modèles d'ordre plus élevé s'avérerait rapidement impossible à mettre en oeuvre pratiquement (coût de calcul prohibitif). Cela nous conduit naturellement à envisager l'application de méthodes de type intégration dynamique stochastique.

3. DETECTION/POURSUITE HMM

Plusieurs types d'application des HMM à la poursuite existent en particulier pour les raies fréquentielles [8], temps de retards [9], ou sources bande étroite en sonar [10]. Le principe consiste à estimer la densité de probabilité a posteriori des états du processus, $\operatorname{Prob}[e_i(t_k)/Z^k]$, où Z^k représente les mesures disponibles de t_0 à t_k , et $\{e_i\}_{i=1}^{N_r}$ définissent les N_r états discrets (ici le retard inter-antennes) que peut occuper le processus. Puis, l'estimation du retard inter-antennes est par exemple fournie par le maximum des $\operatorname{Prob}[e_i(t_k)/Z^k]$ à chaque instant [11]. La poursuite et la détection sont réalisées simultanément en incluant dans la chaîne de Markov un état 0 qui symbolise la détection [9]. Par souci de simplicité, seul le principe de la poursuite est décrit ici. L'expression $\operatorname{Prob}[e_i(t_k)/Z^k]$ se décompose suivant la règle de Bayes en :

$$\operatorname{Prob}[e_i(t_k)/Z^k] = G \cdot \operatorname{Prob}[z(t_k)/e_i(t_k)] \cdot \operatorname{Prob}[e_i(t_k)/Z^{k-1}] \quad (10)$$

où G est un facteur de normalisation; $z(t_k)$ est constitué des signaux temporels reçus sur chacune des antennes pendant la durée d'une intercorrélacion court-terme, et $z(t_k) = [z_A(t_k), z_B(t_k)]'$. Les quantités à estimer pour former l'expression (10) caractérisent complètement la chaîne de Markov. Elles représentent les probabilités conditionnelles des mesures dans chaque état ainsi que les probabilités a priori des états. Ces dernières s'expriment par :

$$\operatorname{Prob}[e_i(t_k)/Z^{k-1}] =$$

$$\sum_{j=1}^{N_r} \operatorname{Prob}[e_i(t_k)/e_j(t_{k-1})] \operatorname{Prob}[e_j(t_{k-1})/Z^{k-1}] \quad (11)$$

où $\operatorname{Prob}[e_i(t_k)/e_j(t_{k-1})] = a_{ji}$ est la probabilité de transition entre états, qui s'écrit dans un contexte gaussien pour un modèle d'ordre 1:

$$a_{ij} = C \int_{\tau_j - \frac{\Delta\tau}{2}}^{\tau_j + \frac{\Delta\tau}{2}} \exp -\frac{1}{2} \left(\frac{\tau - \tau_i}{\Gamma_\tau} \right)^2 d\tau \quad (12)$$

où $\Delta\tau$ est la largeur d'un canal d'intercorrélacion, Γ_τ caractérise les fluctuations du processus et C constante de normalisation telle que $\sum_{j=1}^{N_r} a_{ij} = 1 \forall i = 1, \dots, N_r$, et $A = \{a_{ij}\}_{i,j=1}^{N_r}$. Notons M le nombre de canaux d'intercorrélacions disponibles en sortie d'une intercorrélacion court terme, sous l'hypothèse où les signaux temporels sont gaussiens centrés, on a :

$$\operatorname{Prob}[z(t_k)/e_i(t_k)] = (2\pi)^{-M} |C|^{-\frac{1}{2}} \exp -\frac{1}{2} z'(t_k) C^{-1} z(t_k) \quad (13)$$

où la matrice de covariance se décompose selon [9]:

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{12}' & C_{22} \end{bmatrix} \quad (14)$$

avec $C_{11} = C_{22} = (S + B)I$ et I la matrice identité ($M \times M$). La sous-matrice C_{12} caractérise la covariance entre les signaux sur les deux antennes. Elle est donc nulle en présence de bruits décorrélés. En présence d'une source, un exemple de matrice C_{12} est donné dans le cas où le nombre d'échantillons temporels M vaut 5 et où le retard vaut 2 périodes d'échantillonnage:

$$C_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

En développant l'expression (13), on montre moyennant une hypothèse de faible S/B qu'elle se réduit à :

$$\operatorname{Prob}[z(t_k)/e_i(t_k)] \simeq D \left(\frac{B}{2S + B} \right)^{M/2} \exp \left(\frac{S y^i(t_k)}{2B(2S + B)} \right) \quad (16)$$

où

$$y^i(t_k) = M(P_A(t_k) + P_B(t_k) + C_{AB}(\tau_i, t_k, \frac{T}{K})) \quad (17)$$

$P_A(t_k)$ et $P_B(t_k)$ étant respectivement les puissances des signaux reçus sur les deux antennes et D un facteur de normalisation. L'estimateur de l'état occupé par la chaîne de Markov à la récurrence k est donc défini par le maximum de $\operatorname{Prob}[e_i(t_k)/Z^k]$ pour $i=1, N_r$, la piste formée étant constituée par la position de ce maximum au cours du temps. L'algorithme ainsi défini permet la poursuite d'une source unique. Dans un contexte multisources, il est nécessaire d'une part d'employer autant de filtres que de sources et d'autre part de définir des domaines de travail en retard disjoints.

4. RÉSULTATS

4.1. simulations de Monte-Carlo

Dans une première partie, nous comparons les performances en détection de ces deux algorithmes de détection/poursuite simultanées avec celles de méthodes de poursuite classiques opérant sur des événements détectés en sortie de normalisation/détection des intercorrélacions court-terme [12]. Ces algorithmes de poursuite utilisent soit un filtre de Kalman linéaire actualisé par la

détection la plus proche (Nearest Neighbor Association ou NNAF [12]), soit un principe de poursuite HMM où la mesure est constituée des évènements détectés [10], nommé HMM-PDA. Le scénario comporte une source large bande dans la gamme [0-300 Hz] échantillonnée à 1000 Hz. Le Doppler de la source évolue entre 10^{-5} et 10^{-4} au cours du scénario de durée 15 minutes. La figure 1 décrit les performances en terme de P_D en fonction du S/B de la source, obtenues au moyen de 50 Monte-Carlo, pour une P_{FA} de sortie de 4.10^{-3} . On observe une nette différence entre les performances obtenues avec les deux algorithmes travaillant directement sur la corrélation et ceux exploitant les évènements détectés en sortie de norme. Le gain minimum atteint à une P_D de 0.5 est de l'ordre de 3 dB. Les performances des algorithmes de poursuite HMM et d'intégration temps-échelle dépendent respectivement de la matrice de transition A et de la durée d'intégration dont deux exemples sont fournis sur la figure 1.

4.2. signaux mer

Le comportement de ces algorithmes a également été analysé sur des signaux recueillis en Méditerranée au moyen d'une antenne de coque et d'une antenne linéaire remorquée, pendant 30 minutes. Les conditions de bathycélérimétrie impliquent l'existence de deux types de rayons, respectivement un réfléchi une fois sur le fond et un réfléchi fond puis surface. Les valeurs théoriques des quatres pistes de retards entre les deux antennes au cours du temps sont tracées sur la figure 2. La figure 3 contient les évènements détectés en sortie d'intercorrélations court-terme de durée 500 ms ($P_{FA}=1.2\%$). Le Doppler théorique est représenté sur la figure 8. On observe une bonne concordance entre théorie et observations sauf en début d'expérimentation où la durée de corrélation est trop importante vis à vis du Doppler théorique. Les résultats obtenus avec les deux méthodes de détection/poursuite simultanées sont contenus dans les figures 5 et 6, alors que la figure 4 contient les pistes extraites par un algorithme de type NNAF pour une P_{FA} en entrée de 10%. La durée de l'intégration temps-échelle est de 40 secondes et le nombre de HMM utilisés pour la figure 5 est de quatres filtres indépendants. On observe tout d'abord le fractionnement marqué des pistes délivrées par le NNAF, qui s'avère de plus incapable de poursuivre les pistes tant que le S/B est faible (jusqu'à $t=1000$ secondes). La poursuite par HMM présente des résultats intéressants puisque trois pistes de retard ont été détectées et poursuivies, mais la nécessité de définir au préalable le nombre de filtres limite son intérêt. Les performances les plus intéressantes sont celles de l'intégration temps-échelle pour laquelle la piste centrale est bien détectée, et ce à partir de $t=200$ secondes. Les deux pistes extrêmes apparaissent partiellement à cette P_{FA} de sortie. On a enfin représenté sur la figure 7 le Doppler estimé par l'intégration temps-échelle à comparer au Doppler théorique sur la figure 8.

5. CONCLUSION

Deux algorithmes de détection/poursuite simultanées ont été décrits et comparés à des méthodes classiques où détection et poursuite sont réalisées successivement. On observe sur simulation et sur signaux sonar enregistrés en mer le gain apporté par de telles approches où le modèle peut être soit déterministe (intégration temps-échelle) soit stochastique (HMM). L'intégration temps-échelle apparait comme une des méthodes les plus prometteuses dans le contexte multi-sources qui est traité ici.

Remerciements: Cette étude a été partiellement financée par la DRET (Paris, France).

RÉFÉRENCES

- [1] Y. Chocheyras, and L. Kopp, "Limitations of Joint Space and Time Processing for Moving Source Localization with a Few Sensors" In *Proc. of ICASSP* (Detroit, MI, May 1995), pp.3559-3562.
- [2] O. Zugmeyer, J.P. Le Cadre, "Temporal integration for array processing" *J. of Acoust. Soc. Am.* (93), pp. 1471-1481 (1993).
- [3] Y. Chocheyras, "Time-delay and differential doppler tracking on real data", In *Proc. of the Underwater and Defence Technology Conf.* (London, UK, Feb. 1990).
- [4] G.W. Johnson, and W.A. Bradford, "Thresholds in combined detection and source motion estimation", In *Proc. of ICASSP* (Dallas, TX, 1987), 1095-1098.
- [5] G.C. Carter and C.H. Knapp, "Estimation of time-delay in the presence of source or receiver motion", *J. of Acoust. Soc. Am.* (61), 6, (1977).
- [6] J.W. Betz, "Comparison of the deskewed short-time correlator and the maximum likelihood correlator", *IEEE trans. on ASSP*, vol. 32, No 2, 1984, 285-294.
- [7] W.B. Adams, J.P. Kuhn, and W.P. Whyland, "Correlator compensation requirements for passive time-delay estimation with moving sources or receivers", *IEEE trans. on ASSP*, vol. 28, No 2, Apr. 1980, 158-168.
- [8] R.L. Streit, and R.F Barrett, "Frequency line tracking using Hidden Markov models" *IEEE trans. on ASSP*, vol. 38, No 4, Apr. 1990.
- [9] R.E. Bethel, R.G Rahikka, "Optimum time delay detection and tracking", *IEEE trans. on AES*, vol. 28, No 3, July 1992, 675-696.
- [10] S. Sitbon, "A comparative study of a new HMM tracker and conventional passive tracking algorithms", In *Proc. of the Underwater and Defence Technology Conf.*, London, UK, July 1994, .
- [11] L.R. Rabiner, "An introduction to Hidden Markov models", In *IEEE ASSP Magazine*, Jan. 1986.
- [12] Y. Bar-Shalom, and T.E Fortmann, *Tracking and data association*, Academic Press, N.Y.1988.

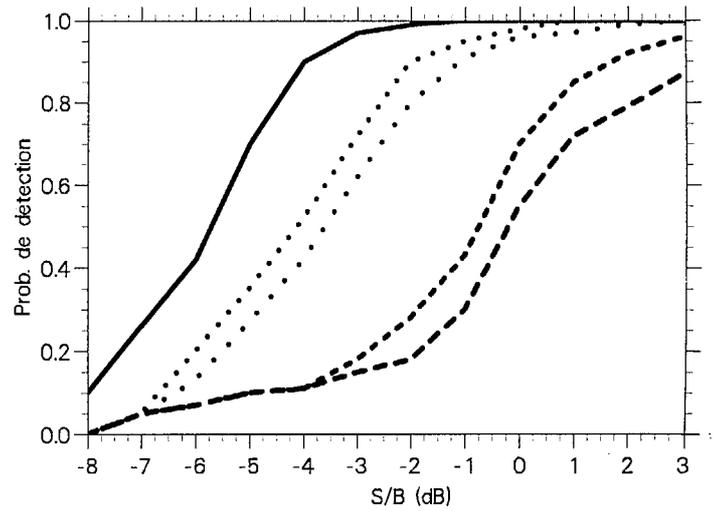


Fig.1 Courbes TOC, $P_D = f(S/B)$.

- - - NNAF
- . . . HMM-PDA
- . . . HMM sur signaux
- temps/échelle T=100s
- temps/échelle T=400s

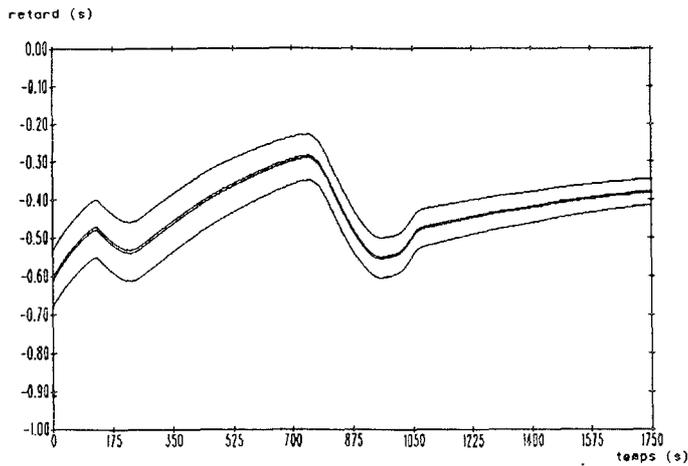


Fig.2 Retards théoriques correspondant aux trajets réfléchis Fond et Fond-Surface.

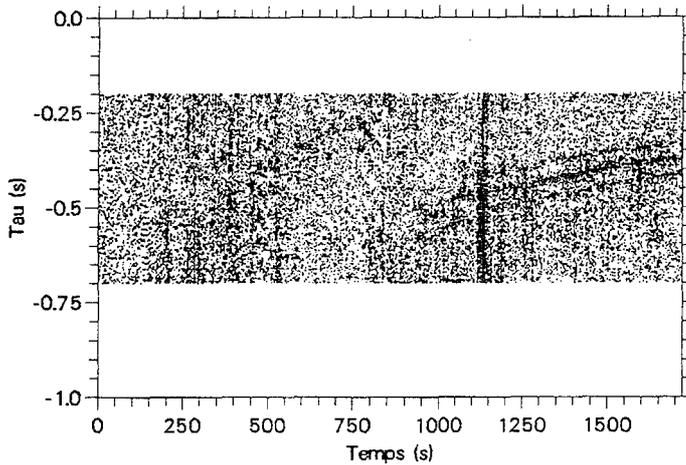


Fig.3 Détections en sortie d'intercorrélation de durée 500 ms.

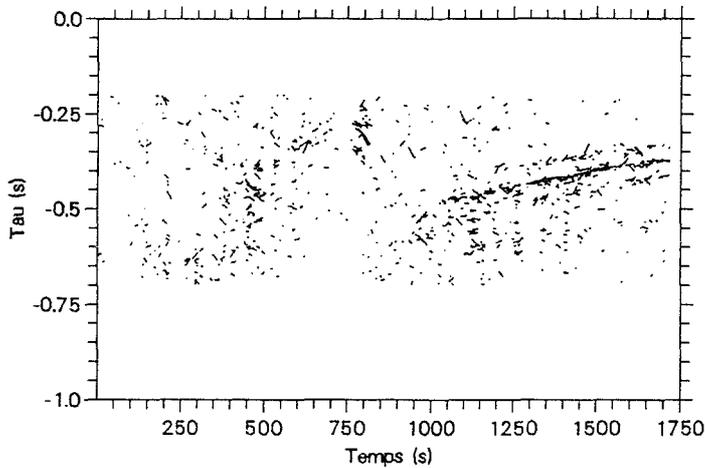


Fig.4 Pistes extraites en retard par l'ADT NNAF.

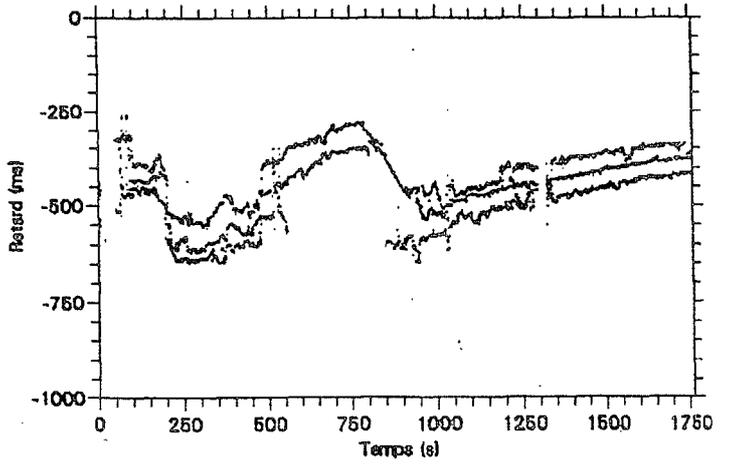


Fig.5 Pistes extraites en retard par l'ADT HMM.

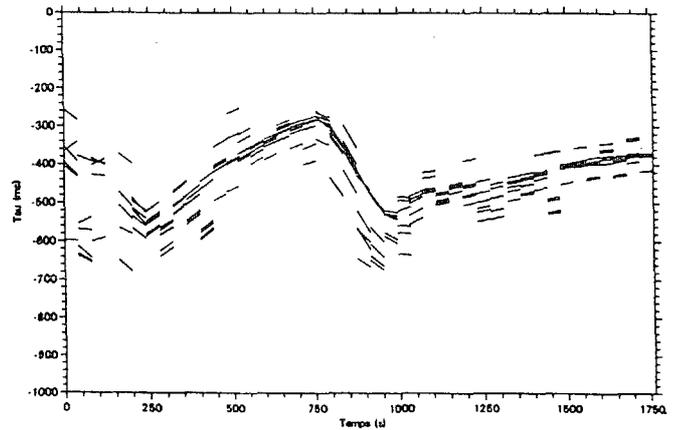


Fig.6 Pistes extraites en retard par l'ADT Temps-Échelle.

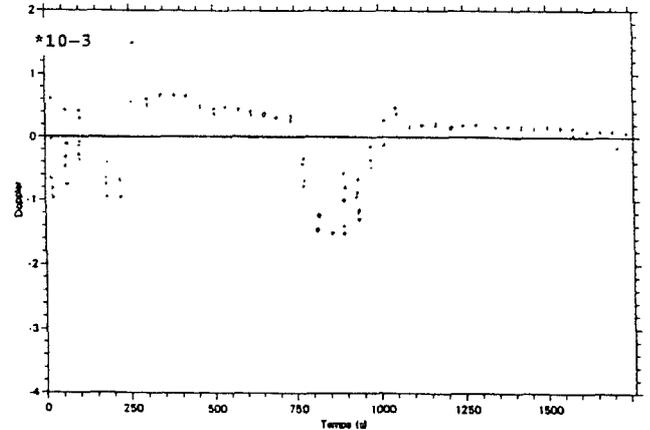


Fig.7 Doppler estimé par l'estimateur Temps-Échelle.

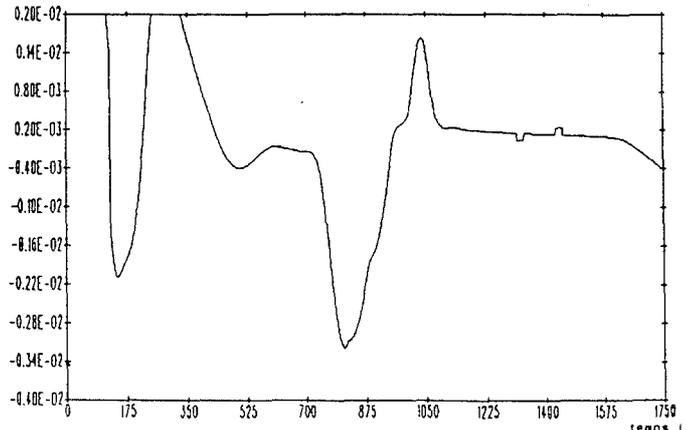


Fig.8 Doppler théorique.