

Trajectographie passive bistatique en interception sonar

Denis Pillon⁽¹⁾ et Thierry Martin⁽²⁾

⁽¹⁾ASM Ingénierie, 101 rue Pasteur,
BP 240, 83089 Toulon cedex

⁽²⁾DCN/ING/SUD, chemin de la Gardiole,
83140 Six-Fours

RÉSUMÉ

Il s'agit de trajectographier simultanément un sonar actif et une cible réfléchissante à partir des mesures d'angles et de retards faites sur les signaux interceptés par un observateur passif. Bien que l'émetteur soit non coopératif contrairement au cas classique du sonar actif bistatique, on montre que cette méthode permet, dans certains cas, une amélioration sensible des résultats de localisation par rapport aux méthodes habituelles de trajectographie passive.

ABSTRACT

This paper proposes the target motion analysis simultaneously of an active sonar and a reflecting target from measures of bearings and delays which are obtained from signals intercepted by a passive observer. The transmitter is not cooperative and less known than in the classical case of a bistatic active sonar. Nevertheless, we show that this method, which is purely passive, brings in certain cases a sensible improvement on results of localisation in comparison to usual methods of target motion analysis.

1 Introduction.

Localiser un sonar actif est d'une importance primordiale pour un sous-marinier. Par exemple, cela lui permet d'estimer le risque d'avoir été détecté par ce sonar adverse et donc d'établir une tactique qui va de l'évasive à l'attaque.

Pour résoudre ce problème d'estimation, de nombreux moyens ont été développés depuis plus de cinquante ans. On peut citer les méthodes les plus classiques comme la courbure du front d'onde (CFO), la télémétrie par trajets multiples dans un plan vertical (TTM) ou la triangulation. Toutes ces approches sont dites de localisation "instantannées" c'est à dire qu'elles cherchent à estimer les coordonnées (x,y) de l'émetteur à partir d'une seule émission interceptée (monocoup).

Néanmoins, en pratique, ces méthodes ne sont pas toujours utilisables, par exemple, à cause de la méconnaissance des conditions de propagation ou de la directivité en site de l'émetteur (on ne reçoit pas toujours des trajets multiples permettant de faire de la TTM). La CFO a une portée limitée (zone de Fresnel). Quant à la technique multiplates-formes, comme son nom l'indique, elle suppose que l'on ait à sa disposition deux antennes éloignées travaillant dans les gammes de l'interception ce qui n'est pas souvent envisageable (coût, problèmes de transmission).

Pour dépasser ces limitations intrinsèques aux méthodes monocoup, les sonaristes ont été amenés à proposer des algorithmes de trajectographie passive (TP) qui exploitent les mesures relatives à plusieurs récurrences successives.

Dans les sonars actuels, les méthodes de TP utilisent les mesures d'Azimut seul (TPA)[2] ou d'azimut et de fréquence

(TPAF)[3] issues de chaînes de veille sur bruit rayonné. Mais on peut aussi faire fonctionner ces algorithmes habituels de TP à l'aide des mesures plus épisodiques, issues des chaînes d'Interception Sonar (IS). Bien évidemment, il est nécessaire que le sonar actif adverse émette plusieurs fois ce qui est souvent le cas en vue de réduire le taux de fausses alarmes, ou de surveiller continuellement une zone maritime.

Sur un plan opérationnel, la TPA en IS n'est pas toujours utilisable car elle demande une manoeuvre judicieuse du récepteur pour obtenir une solution unique [1-2]. En cas contraire, la TPA est dite partielle (TPAP) et l'on obtient alors une infinité de solutions homothétiques, chacune étant paramétrée, par exemple, par une distance entre l'émetteur et le récepteur.

La TPAF ne pose pas de tels problèmes d'observabilité et une solution unique peut être obtenue même si l'observateur reste en mouvement rectiligne uniforme (MRU) [1 et 3]. La seule exception est le cas où le porteur se rapproche ou s'éloigne sur la ligne de visée, ce qui est d'ailleurs un scénario tout à fait plausible dans le cadre de l'interception : évasive ou attaque d'un sous-marin cherchant à présenter un index minimal vis à vis de l'émetteur. La TPAF est aussi inutilisable lorsque l'adversaire emploie un sonar agile en fréquence, des modes d'émissions diversifiés ou des codes rendant délicate la mesure des grandeurs fréquentielles.

Pour dépasser certaines des limitations entraînées par la simple application des algorithmes de TPA et de TPAF au cas de l'interception, nous proposons ici d'exploiter par TP, l'effet Bistatique (TPB). Cet effet peut exister si un objet suffisamment réflecteur est présent dans le disque insonifié par le sonar actif adverse [5]. L'intercepteur va pouvoir fournir, entre autres,

l'azimut de l'écho provenant de l'objet "illuminé" et l'écart de temps ΔT entre le trajet arrivant directement de l'émetteur et celui transitant par le réflecteur.

Les hypothèses et notations retenues pour traiter ce problème font l'objet du paragraphe suivant. Ensuite, nous présentons certaines géométries où l'unicité de la solution n'est pas assurée. Nous évaluerons la borne de Cramer-Rao dans quelques cas. Une initialisation d'un algorithme type maximum de vraisemblance est ensuite décrite et par simulation, nous jugerons de l'efficacité de cette méthode.

2 Hypothèses et notations.

Nous supposons un milieu plan (2D), de célérité c connue dans lequel se meuvent un intercepteur (I), un émetteur (E) et une cible réfléchissante (C), tous trois étant en MRU.

Nous allons utiliser un repère relatif lié à I, orthonormé, orienté Nord-Est. L'instant de référence choisi est l'instant final de la N-ième récurrence reçue car c'est à l'instant présent qu'il est intéressant, sur le plan opérationnel, de fournir une estimation des distances.

Le vecteur d'état que nous allons chercher à estimer est

$$\underline{X} = [x_E(t_N), y_E(t_N), \dot{x}_E, \dot{y}_E, x_C(t_N), y_C(t_N), \dot{x}_C, \dot{y}_C]$$

où $(x_E, y_E), (x_C, y_C)$ sont respectivement les coordonnées relatives de l'émetteur et de la cible et où (\dot{x}_E, \dot{y}_E) et (\dot{x}_C, \dot{y}_C) sont leurs vitesses relatives respectives. Un cas particulier est celui d'un écho fixe (haut fond, épave, montagne sous-marine) de position inconnue : le vecteur d'état devient alors 6D. Si l'on connaît de plus les coordonnées de cet écho fixe, la TPB devient triviale.

Dans le cas, où l'émetteur est fixe (sonar trempé d'hélicoptère par exemple), alors \underline{X} est aussi de dimension plus réduite. Nous excluons ces cas particuliers, a priori plus faciles à traiter que le cas général 8D où tous les participants sont mobiles.

Définissons maintenant les équations de mesure donnant les azimuts non bruités :

$$\beta_E(t_i) = \text{Arctg} \left[\frac{x_E(t_N) + (t_i - t_N)\dot{x}_E}{y_E(t_N) + (t_i - t_N)\dot{y}_E} \right]$$

$$\beta_C(t_i) = \text{Arctg} \left[\frac{x_C(t_N) + (t_i - t_N)\dot{x}_C}{y_C(t_N) + (t_i - t_N)\dot{y}_C} \right]$$

où t_i est l'instant de détection de la $i^{\text{ème}}$ récurrence sur son trajet direct (EI). Ceci est une simplification du modèle car en réalité, on mesure les angles $\beta_E(t_i - \tau_{EI})$ où τ_{EI} est le temps de propagation entre l'émetteur et le récepteur (même remarque pour β_C).

Ce type d'approximation, habituelle en TP, est légitime si les vitesses des mobiles sont faibles (≤ 10 noeuds), les distances suffisamment importantes (≥ 1 km), ce qui correspond à des vitesses azimutales faibles. De plus, en pratique, l'écart de temps ΔT est faible vis à vis des temps de parcours et des cadences d'émission. Enfin, on peut débiaiser l'estimation obtenue par le modèle simplifié en tenant compte d'un temps de parcours des rayons.

A ce même instant t_i , nous mesurons un écart de temps $\Delta T(t_i)$ donné par un modèle aussi simplifié des temps de

parcours :

$$\Delta T(t_i) = \frac{1}{c} (|EC|_i + |CI|_i - |EI|_i),$$

avec

$$\begin{aligned} |EC|_i &= [(x_E(t_i) - x_C(t_i))^2 + (y_E(t_i) - y_C(t_i))^2]^{\frac{1}{2}} \\ d_C = |CI|_i &= [x_C(t_i)^2 + y_C(t_i)^2]^{\frac{1}{2}} \\ d_E = |EI|_i &= [x_E(t_i)^2 + y_E(t_i)^2]^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

En pratique, pour que cette mesure temporelle soit possible, il faut que C ne soit pas orientée dans l'axe de l'émetteur, la meilleure géométrie du point de vue de la TPB étant celle de réflexion spéculaire sur C (bissectrice de l'angle $I\hat{C}E$ normale au cap de C).

Chacune de ces mesures (angles β_E^m, β_C^m , temps de retard ΔT_m) est entachée d'un bruit Gaussien, blanc, centré d'écart type connu (respectivement $\sigma_\beta, \sigma_\tau$). En vue de simplifier le présent exposé, σ_β a été choisi identique pour β_E et β_C .

3 Unicité de la solution et borne de Cramer-Rao.

L'obtention de conditions nécessaires et suffisantes d'observabilité pour un problème de TP utilisant des écarts de temps est actuellement un problème ouvert : la TPB n'échappe pas à la règle.

D'une façon moins rigoureuse [4] et non équivalente, on peut chercher les conditions pour lesquelles la matrice d'information de Fisher \mathcal{F} est définie positive, ce qu'on appelle parfois l'identifiabilité du système. Cette approche s'est révélée ici infructueuse car en TPB la matrice d'information de Fisher est grande (8x8) et son expression analytique, bien que ne posant pas de problèmes de calcul, est complexe. Nous nous sommes donc contentés de vérifier numériquement pour de nombreuses cinématiques le caractère défini ou non de \mathcal{F} pour un écart type arbitraire fixé.

Seul le cas où les trois éléments navigent de conserve (sont fixes dans le repère relatif) correspond à un cas indéfini. Les mesures non bruitées sont alors des constantes et, pour un quelconque émetteur à une distance arbitraire de l'intercepteur dans la direction β_E , correspond une cible C se trouvant à l'intersection de la direction β_C et de l'ellipse de foyers E et I. Les dimensions de cette ellipse sont données par l'écart de temps considéré.

Des cinématiques un peu particulières, comme celles où l'émetteur et la cible se déplacent sur les lignes de visées de l'intercepteur ($\beta_C = cste, \beta_E = cste$) ne présentent pas de problèmes d'identifiabilité.

La TPB posant à première vue peu de problèmes d'unicité de la solution dans le cas déterministe, il s'agit maintenant de savoir si la valeur de la borne sur les distances est acceptable.

Rappelons que des $\frac{\sigma_D}{D}$ de l'ordre de 10 à 20 % sont des valeurs typiques en TP [2],[3]. Nous avons calculé $\frac{\sigma_D}{D}$ donné par la borne pour l'émetteur (σ_E) et pour la cible (σ_C).

Sur les figures 1 à 4, nous avons tracé, pour divers scénarios, les ellipsoïdes correspondant à la borne (à 3σ) à l'instant final. Ces ellipsoïdes sont très allongés, leur grand axe étant

porté par la ligne de visée à l'instant considéré. Les trajectoires suivies par les trois participants sont tracés en traits fins. Ces quatre figures ont été obtenues pour le même MRU du récepteur (cap= -45° , vitesse= 7 m/s , durée= 5 min) et le même $\sigma_\beta = 0.1^\circ$ ce qui est faible mais correspond aux précisions en interception où les signaux sont en général très puissants. L'azimut de départ de l'émetteur est toujours 60° et celui de la cible 20° . La cible évolue sur la gauche des figures, l'émetteur sur la droite et le récepteur près de l'origine. La cible et l'émetteur se déplacent à 5 m/s .

Les figures 1 et 2 sont obtenues pour une distance initiale de l'émetteur de 16 km , de la cible de 8 km et un σ_τ de 5 ms . Ce qui change entre les deux c'est le nombre d'émissions sonar. Pour la figure 1, il y a eu 20 émissions cadencées à 15 secondes contre 10 émissions toutes les 30 secondes pour la figure 2. On constate que les ellipses n'ont pas beaucoup évoluées (en \sqrt{N}), σ_E valant autour de 11% et σ_C 5% . Ce constat a par ailleurs pu être fait sur d'autres scénarios.

Par contre, les mouvements relatifs notamment de C et de E sont très influents comme le montrent les figures 3 et 4. Là, le σ_τ est pris de 1 ms pour les 10 récurrences à 30 secondes, les distances initiales de E et de C sont de 5 km . Sur la figure 3 l'émetteur et le récepteur se rapprochent (cap de l'émetteur= 10° et cap de la cible= 100°) et l'on observe des ellipses très petites ($\sigma_E \simeq \sigma_C \simeq 3\%$). Le seul changement sur la figure 4 a été de faire faire demi-tour à l'émetteur (cap= 190°). On constate alors que l'incertitude sur les distances devient très grande. Sur d'autres scénarios, nous avons pu constater que la distance entre E et C n'est pas d'une importance primordiale, pour des σ_τ identiques bien sûr. D'autres part, σ_E et σ_C semblent évoluer comme $\sqrt{\sigma_\tau}$.

En résumé, pour des portées de l'ordre d'une vingtaine de kilomètres et des conditions de cinématiques entraînant une rapide variation de ΔT , la précision sur la distance sur les deux objectifs par TPB est tout à fait acceptable.

4 Algorithme d'estimation.

Nous avons utilisé pour minimiser le critère quadratique l'algorithme NL2SOL à gradient calculé de la bibliothèque ACM. Le point initial est obtenu selon une procédure hiérarchisée dont le principe de base dérive des procédures d'association de pistes multiplate-formes en présence de parallaxe [6].

Avec le lot des β_E^m , on effectue une TPAP qui fournit les trois estimations suivantes à l'instant de référence :

- $\hat{\beta}_E$ azimut de l'émetteur,
- \hat{K}_E cap relatif,
- $\hat{V}_E(d_E)$ vitesse relative paramétrée par la distance inconnue.

La même opération pour les mesures β_C^m donne $\hat{\beta}_C$, \hat{K}_C , $\hat{V}_C(d_C)$. Ensuite pour un azimut estimé $\hat{\beta}_E(i)$, on cherche la distance $d_E(i)$ telle que l'écart quadratique $\sum_i (\Delta T_m(i) - \Delta \tau(i))^2$ soit minimal. Pour ce faire, on échantillonne d_E selon

un certain pas (1 km) dans une plage de distance donnée ($3\text{-}60\text{ km}$ ici). On peut réitérer cette procédure pour chaque récurrence i et en effectuant la moyenne des distances ainsi obtenues, on obtient un point d'initialisation satisfaisant de l'algorithme de minimisation.

Ce point s'est révélé satisfaisant car pour tous les scénarios référencés au paragraphe précédent, nous avons constaté par simulation de Monte Carlo une efficacité statistique meilleure que 1.05. Il n'y a jamais eu de comportement erratique de NL2SOL, ce qui est encourageant pour passer aux signaux réels. La figure 5 présente un résultat de simulation pour 100 réalisations avec des conditions proches de la figure 4, excepté que $\sigma_\tau = 1\text{ ms}$. On constate que les trajectoires résultats, représentées par l'ensemble des traits grisés sont bien contenues dans les ellipses à 3σ .

5 Conclusion.

Nous avons donné ici une vue d'ensemble de la TPB, qui exploite deux angles et un écart de temps et qui donne des résultats intéressants pour certains scénarios réalistes en interception sonar, pour lesquels les autres méthodes de localisation sont inopérantes.

On pourrait aussi utiliser un vecteur d'état plus grand intégrant aussi la (ou les) fréquences inconnues de l'émission qui est dopplérisée différemment par E et C. Cet apport de la fréquence peut sans doute améliorer la précision de la position estimée comme en TPAF [3] mais est sujet aux mêmes limitations que la TPAF en IS évoquées en introduction.

La mesure des écarts de temps sur front de montée ou par intercorrélacion requière moins d'hypothèses concernant l'émetteur bien quelle ne soit pas toujours possible (faisceaux tournant, modulation d'enveloppe).

On peut aussi envisager d'utiliser un modèle de propagation par rayon entre les trois participants afin de pouvoir travailler dans des conditions de bathycélérimétrie moins restrictives.

Références

- [1] C. JAUFFRET, D. PILLON "Observability in passive target motion analysis"
IEEE Trans. On Aerospace and Electronic Systems Vol. 32, No 4, Oct. 1996, pp 1290-1300.
- [2] NARDONNE, LINDGREN, GONG "Fundamental properties and performance of conventional bearing-only target motion analysis"
IEEE Trans. AC, AC-29, Sep. 1984, 775-787.
- [3] J.M. PASSERIEUX, D. PILLON, P. BLANC-BENON, C. JAUFFRET "Target motion analysis with bearing and frequency via instrumental variable estimator"
ICASSP-89, Gasgow, 458-462.
- [4] J. ARNOLD, Y. BAR-SHALOM, R. ESTRADA, R. MUCCI "Target parameter estimation using measurements acquered with a small number of sensors"
IEEE OE, Vol. OE-8, pp 163-172, jul 83.

- [5] H. COX “Fundamentals of bistatic active sonar”
Underwater Acoustic Data Processing 3-24 1989 Kluwer
Academic Publisher.
- [6] D. PILLON, P. VERVEUR “Regroupement de pistes
angulaires issues d’antennes passives dispersées”
GRETSI 1989 pp 141-144.

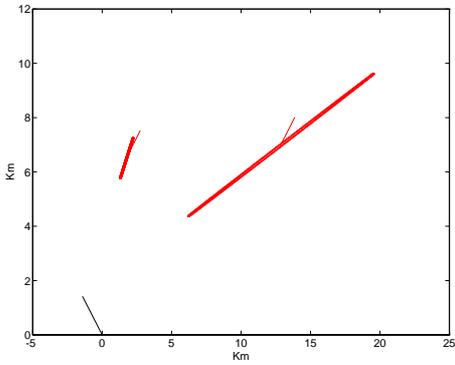


FIG. 1 — 20 émissions toutes les 15 secondes

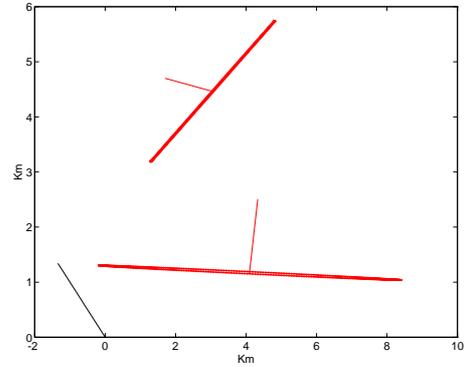


FIG. 4 — E et C se suivent

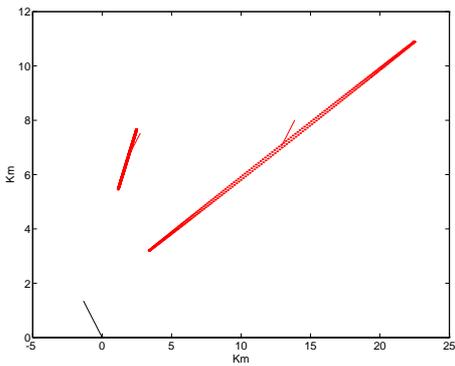


FIG. 2 — 10 émissions toutes les 30 secondes

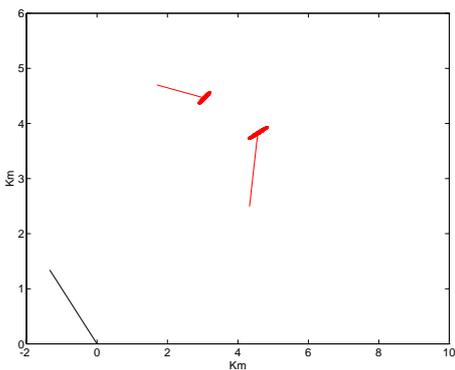


FIG. 3 — Rapprochement de E et C

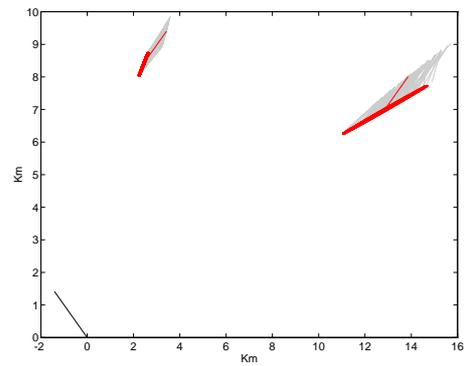


FIG. 5 — Résultats de simulation