

Application de la théorie de l'information pour l'extraction passive radar en guerre électronique marine

Cécile Broly*#, Gérard Alengrin#, Jean-Marc Lopez*

*DGA/DCE/CTSN/LAS - Cellule Mesures et Renseignements Electroniques
BP 28
83800 TOULON NAVAL.

#Université de Nice-Sophia-Antipolis - Laboratoire I3S
41 bd Napoléon III
06041 NICE.

RESUME

Dans l'environnement électromagnétique naval, les impulsions émises par les radars sont recueillies par des récepteurs passifs. Ces impulsions sont regroupées en blocs selon la similitude de certains paramètres. Le but de cette étude est alors de mettre en place un critère de regroupement des blocs d'impulsions pour reconstruire les formes d'ondes émises par les radars. Cela doit permettre d'obtenir une meilleure qualité d'identification d'émetteur. La méthode de regroupement des blocs utilisée est une méthode de fusion basée sur un calcul d'entropie, l'entropie permettant d'estimer le degré de désordre du signal obtenu pour les cas de fusion envisagés.

1 Introduction

La problématique étudiée s'inscrit dans le contexte de la guerre électronique navale. Du fait de la complexité des nouvelles formes d'ondes radar liée à l'agilité des différents paramètres, les impulsions émises par un radar unique se répartissent sur plusieurs blocs. Il est donc nécessaire de les fusionner pour pouvoir reconstruire ces formes d'onde.

Dans cet article, nous nous intéresserons à l'application de la notion d'entropie à la fusion de blocs d'impulsions radars. Nous étudierons particulièrement la robustesse de cette méthode vis à vis du problème incontournable des impulsions manquantes.

2 Contexte de l'étude

Le contexte de ces travaux se situe dans les processus mis en oeuvre au sein des systèmes de détection de guerre électronique navale. Le processus de détection, d'analyse et d'identification permet d'identifier les émetteurs adverses afin de maîtriser l'ensemble du spectre électromagnétique pour éventuellement gêner ou anéantir les manoeuvres adverses [1]. Lors de la détection, les impulsions sont numérisées, et un certain nombre de paramètres (appelés paramètres primaires) caractérisant chaque impulsion reçue sont mesurés, notamment :

ABSTRACT

In naval electromagnetic environment, pulses emitted by radars are collected by ESM receivers. These pulses are gathered to form clusters by using parametric similarity criterions. To achieve this aim, this study shall develop a pulse clustering criterion in order to rebuild radar waveform. This should allow a better quality of identification. This cluster grouping method is an entropy based fusion method. The entropy is used to estimate the degree of disorder of measured clusters for which a fusion is intended.

- son angle d'arrivée (AOA) qui donne l'azimut du radar détecté.
- sa fréquence nominale (F_n) qui est la fréquence d'émission moyenne de l'impulsion radar.
- sa largeur d'impulsion (LI) qui fournit l'étalement temporel de l'impulsion détectée.
- son niveau (N), qui est l'amplitude de l'impulsion.
- le temps d'arrivée (TOA) qui donne la date d'arrivée de l'impulsion.

Puis, les impulsions sont regroupées selon des critères de similitude construits sur les paramètres primaires. Ce regroupement doit être réalisé de telle sorte qu'à un seul bloc corresponde au plus un seul émetteur. Sur chaque bloc sont définis des paramètres appelés paramètres secondaires qui sont calculés sur plusieurs impulsions. Le paramètre secondaire utilisé pour cette étude est la Période de Répétition des Impulsions (PRI) qui fournit l'intervalle de temps entre deux impulsions successives.

3 Présentation du problème

La méthode de tri d'impulsions actuellement utilisée est un tri AOA- F_n -LI. Cette méthode permet normalement de séparer les émetteurs pour l'identification, chaque plot correspondant à un émetteur.

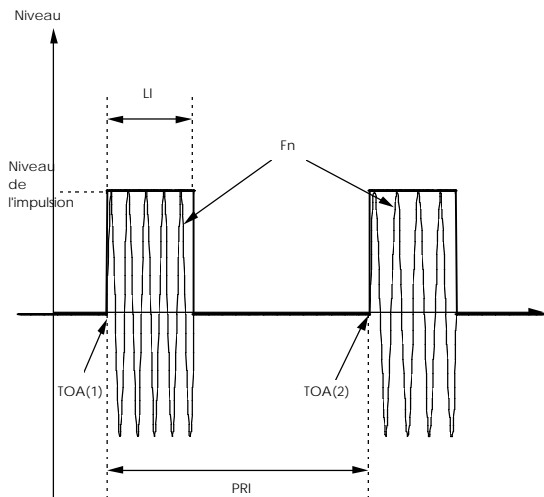


Fig 1 : Description des principaux paramètres d'une impulsion.

Actuellement, les nouvelles formes d'onde radars sont plus complexes, c'est à dire qu'un radar peut émettre pour un même mode sur plusieurs fréquences ou plusieurs LI. Dans ce cas, les impulsions d'un seul radar sont réparties sur plusieurs blocs qu'il faut fusionner avant de vouloir calculer les paramètres secondaires

4 Principe

Le principe repose sur les observations suivantes :

- l'histogramme des différences de temps d'arrivée (ΔTOA) des impulsions successives de chaque bloc présentera, pour un émetteur à PRI fixe, un maximum à une différence de temps d'arrivée correspondant à la PRI du bloc. Si un radar émet à une PRI fixe sur plusieurs blocs, les PRI trouvées sur chaque bloc sont des multiples de la PRI du radar. Si ces blocs sont fusionnés, l'histogramme des ΔTOA présentera peu de classes, un maximum se dégageant nettement pour la PRI.
- par contre, si deux blocs n'appartenant pas au même radar sont fusionnés, l'histogramme résultant fait apparaître un grand nombre de classes dues aux combinaisons des PRI de chaque bloc.

Les figures 2 montrent un exemple de fusion de deux blocs appartenant au même radar, et les figures 3 la fusion de deux blocs n'appartenant pas au même radar.

Certaines références bibliographiques [2] suggèrent d'utiliser le concept d'entropie pour décider de la fusion des blocs. Ce calcul d'entropie se fait sur les histogrammes des ΔTOA des impulsions et permet d'en mesurer le désordre. Le critère d'augmentation de la cohérence du signal considéré est donc l'ordre.

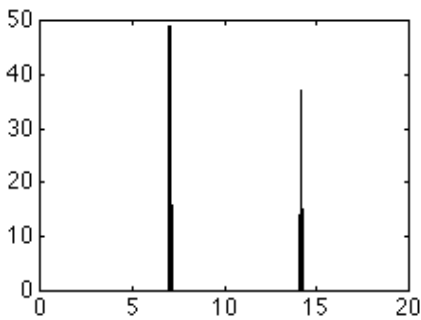


Fig 2a et 2b : Histogrammes des ΔTOA de deux blocs séparés lors du tri appartenant au même radar.

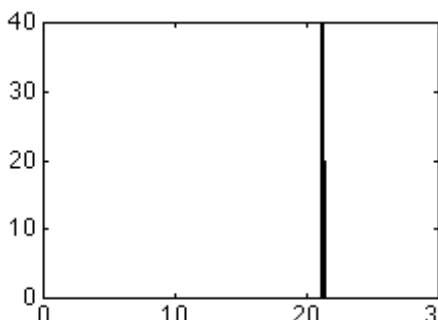


Fig 2c : Histogramme des ΔTOA des deux blocs précédents fusionnés appartenant au même radar émettant à une PRI fixe.

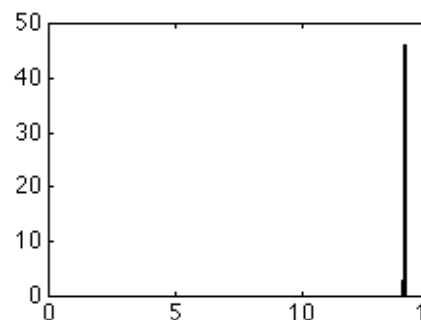
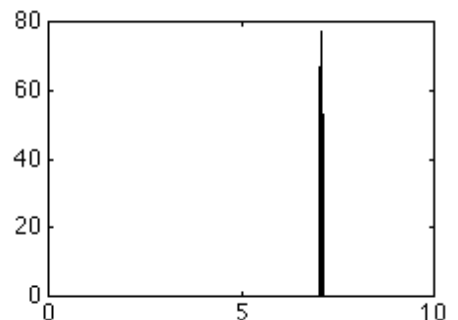


Fig 3a et 3b : Histogrammes des ΔTOA de deux blocs n'appartenant pas au même radar.

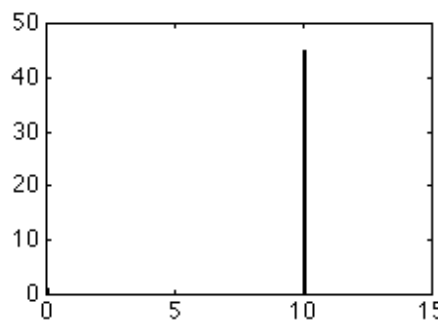
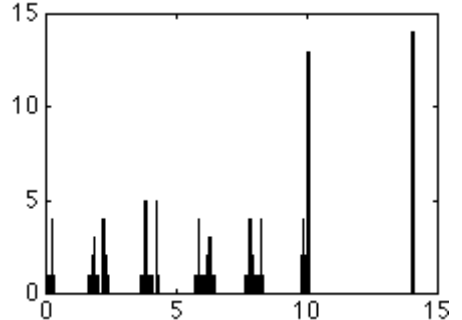


Fig 3c : Histogramme des ΔTOA des deux blocs précédents fusionnés.



Ainsi, si deux blocs appartenant au même radar sont fusionnés, le signal est reconstitué, ce qui augmente sa cohérence. Si, par contre, on fusionne deux blocs

n'appartenant pas au même radars, les deux signaux étant incohérents, le désordre sera augmenté.

Le principe se résume de la manière suivante :

soit A et B deux blocs d'impulsions, A fusionne avec B ssi :

$$\text{entropie}(A) + \text{entropie}(B) > \text{entropie}(A+B) \quad (4.1)$$

Si on considère une combinaison de n blocs, la fusion sera valide si et seulement si l'entropie résultante est inférieure à toutes les sommes d'entropie résultant des combinaisons possibles parmi les n blocs.

L'entropie utilisée est celle définie par Shannon [3], qui s'exprime de la manière suivante:

soit X une variable discrète pouvant prendre n états avec les probabilités p_1, p_2, \dots, p_n

$$E(X) = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2(p_i) \quad (4.2)$$

Pour le calcul de l'entropie d'un histogramme des ΔTOA , les notations sont les suivantes :

- N est le nombre total des ΔTOA .
- n représente le nombre de classes de l'histogramme.
- p_i est la probabilité de la classe i , $p_i = \frac{n_i}{N}$, n_i étant la population de la classe i .

5 Simulations

Plusieurs types de PRI sont considérées :

- PRI fixe.
- stagger, où différentes valeurs de PRI forment un motif répétitif. Le changement de PRI se fait d'impulsion à impulsion.
- switching, qui consiste en une succession de groupes d'impulsions à l'intérieur desquels la PRI est fixe.

Toutes les impulsions émises par un radar ne sont pas recueillies. En effet, les impulsions dont le niveau est trop faible pour être détectées, ou celles qui se superposent ne sont pas considérées, ce qui créent des impulsions manquantes. Ce phénomène est simulé en enlevant aléatoirement un certain nombre d'impulsions. On déterminera ainsi le pourcentage maximum d'impulsions manquantes au delà duquel les histogrammes des ΔTOA deviennent trop dispersés pour que la comparaison d'entropie soit valable.

5.1 Méthodologie.

Les blocs élémentaires sont issus d'un tri AOA-Fn-LI qui est supposé correctement réalisé, c'est à dire que dans chaque bloc ne se trouvent que des impulsions d'un seul émetteur. La fusion n'est envisageable que pour des blocs d'impulsions appartenant à des émetteurs situés sur le même porteur.

Toutes les combinaisons de blocs sont envisagées récursivement : 2 par 2, 3 par 3, etc., le nombre total de combinaisons à analyser pour n bloc étant égal à $2^n - 1$.

5.2 Description des scénarios.

Pour cette simulation, différents scénarios sont envisagés, comportant entre 300 et 800 impulsions.

Les radars de ces scénarios ont été considérés de deux manières :

- incohérents entre eux, cas le plus courant dans la réalité.
- cohérents entre eux (cas où les radars de plateformes différentes sont synchronisés. Pour les simulations ils commencent à émettre au même moment.)

La méthode proposée prend en compte les radars cohérents et incohérents. Une autre solution aurait été de faire l'hypothèse que seuls les radars incohérents soient considérés.

scénario	radar	Fn (MHz)	LI (μs)	PRI (ms)
1	radar 1	9300 8700	4 1	0.3
	radar 2	8500 9100 9500	7 1 3	1
	radar 3	8500 10000	4 10	0.5
	radar 4	9200	2	0.8
2	radar 1	8700 9100	1 4	stagger <5/5> 0.5 0.53 0.7 0.622 0.743
	radar 2	8715	7	switching <3/3> (n=10, n=10, n=40) 0.5 0.53 0.7
3	radar 1	8700 9100	1 4	stagger <5/5> 0.5 0.53 0.7 0.622 0.743
	radar 2	8715	7	switching <3/3> (n=10, n=10, n=40) 0.5 0.53 0.7
	radar 3	9100 9500	12 8	0.5

Tab 1 : Description des scénarios.

6 Résultats

Dans le cas où les radars sont incohérents, cette méthode donne de bons résultats. La comparaison d'entropie des histogrammes des ΔTOA est un critère suffisant pour valider des fusions de blocs correctes.

Dans le cas où les radars sont cohérents entre eux, ces considérations sont insuffisantes pour éviter que des fusions erronées ne soient validées. Si des blocs élémentaires de radars différents ont des PRI proportionnelles, leur histogramme des ΔTOA présentera une classe à l'harmonique de PRI (double de la PRI) plus peuplée que si elle était uniquement dues aux impulsions manquantes. La solution choisie est d'estimer le nombre d'impulsions manquantes. La fusion ne sera possible que pour les cas où le nombre d'impulsions manquantes donné par l'histogramme des ΔTOA et le nombre d'impulsions manquantes estimé seront similaires.

Le nombre d'impulsions manquantes par groupe de blocs est estimé avec un risque minimal (choisi ici de 5%). Soit

une variable K égale à p impulsions manquantes, K suit une loi hypergéométrique avec :

$$P(K=p) = \frac{C_{N_1}^p * C_{N-N_1}^{n-p}}{C_N^n} \quad (6.1)$$

N : nombre d'impulsions total

N_1 : nombre d'impulsions du groupe de blocs considéré

n : nombre total d'impulsions manquantes

Avec ce critère supplémentaire, le tableau de résultat suivant donne le pourcentage d'impulsions manquantes maximal permettant d'obtenir des fusions correctes. Au delà de ce pourcentage, les histogrammes des ΔTOA deviennent trop dispersés (du à la présence de nombreux harmoniques) pour que la comparaison d'entropie soit valable.

scénario	% d'impulsions manquantes radars cohérents	% d'impulsions manquantes radars incohérents
1	30	40
2	25	35
3	20	30

Tab 2 : Résultats

Remarques :

- les résultats sont d'autant meilleurs que les PRI sont complexes. En effet plus le nombre de PRI du motif est important, plus le nombre de classe "parasites" créées lors de la fusion avec un bloc d'un autre radar sera important. L'entropie augmentera donc de manière plus significative. Mais ces cas sont plus sensibles aux impulsions manquantes, car le nombre de classe augmente plus rapidement avec le pourcentage d'impulsions manquantes que dans le cas à PRI fixe
- l'estimation du nombre d'impulsions manquantes n'est pas nécessaire pour les radars incohérents. En effet, deux blocs n'appartenant pas au même radar fusionnés auront un histogramme des ΔTOA présentant de nombreuses classes, même si leurs PRI sont multiples l'une de l'autre (les impulsions des blocs ne se recombineront pas pour donner un train d'impulsions régulier comme pour des radars cohérents).

Cas particulier

Il existe des cas particuliers bien précis pour lesquels cette méthode n'est pas adaptée. Il s'agit notamment de certains trains d'impulsions de PRI stagger, où les impulsions ont la particularité d'être émises successivement sur autant de fréquences qu'il y a de PRI différentes dans le motif du stagger (synchronisation F_n -PRI). Dans ce cas, la fusion des blocs d'impulsions augmente le désordre de l'histogramme car elle diminue la cohérence du signal, qui, de PRI simple (sur chaque bloc d'impulsions) devient un signal à PRI stagger. La fusion n'est donc pas validée.

Pour ce type de scénario, la solution choisie est de rechercher un motif en fréquence pour déterminer une cohérence temporelle. S'il existe un motif récurrent en

fréquence dans l'ensemble d'impulsions considéré, la fusion est validée.

Le motif en fréquence, est déterminé par une "matrice de transition", dénombrant les transitions entre chaque fréquence.

Les impulsions manquantes vont créer des "trous" dans la succession des fréquences. Pour reconstituer des séquences en fréquence correctes, le motif de PRI est identifié également par une matrice de transition (un seuil est calculé pour éliminer les éléments de la matrice les plus faibles dus aux impulsions manquantes.).

La recherche de motif en fréquence permet de confirmer les fusions décidées par calcul d'entropie, et de résoudre les problèmes de fusion rencontrés actuellement.

7 Conclusion

La méthode proposée traite aussi bien les radars incohérents que les radars cohérents. On peut citer comme avantages les points suivants :

- elle donne de bons résultats pour les PRI fixes et complexes, les résultats étant meilleurs pour des radars non cohérents que pour des radars cohérents. Il faut noter que le cas des radars cohérents est très peu fréquent.
- elle n'est pas affectée par les agilités en fréquences et en LI.
- elle est robuste aux impulsions manquantes.

Par contre, on peut souligner les éléments suivants :

- le traitement récursif, qui est coûteux en temps de calcul. Si par hypothèse, les radars considérés sont tous incohérents, alors l'estimation du nombre d'impulsions manquantes par bloc n'est pas nécessaire, ce qui permet d'alléger les calculs.
- l'explosion combinatoire, toutes les combinaisons de blocs devant être envisagés.

Un axe de travail futur est de définir des critères supplémentaires pour sélectionner les blocs dont la fusion est envisageable, ce qui limiterait la combinatoire.

L'inconvénient de cette méthode de fusion où le degré de désordre du signal est estimé par l'entropie est qu'elle ne s'adapte pas à certains cas. Mais, si elle est couplée avec une méthode de recherche de motif en fréquence pour valider les fusions n'ayant pas eu lieu, elle donne d'excellents résultats, les fusions ayant été validées avec succès dans tous les types de scénarios étudiés actuellement.

8 Références

- [1] Schleher D.C., "Introduction to electronic warfare", Artech House, 1986.
- [2] Agg D.A., "The development of an ESM data processing based on pattern recognition techniques", IEE Colloquium on Signal Processing for ESM systems, Londres, 1991.
- [3] OSWALD J., "Théorie de l'information ou analyse diacritique des systèmes", Masson, 1986.