

Application du DCA aux Radars de Surveillances Secondaires

Qiang ZHANG¹, Nicolas PETROCHILOS¹, Fabien BELLOIR¹, Gaspare GALATI²

¹CRESTIC, University of Reims, BP 1039, 51687 REIMS Cedex2, France

²RADARLAB, DISP, Tor Vergata University, Via del Politecnico, 1, 00133 Rome, Italy

nicolas.petrochilos@univ-reims.fr

Résumé – Les Radars de Surveillances Secondaires (SSR) fonctionnent avec deux protocoles de réponses très différents sur la même bande de fréquence dont l’un date de la seconde guerre mondiale. Nous proposons d’utiliser une antenne à formation de voies pour contrer la densité grandissante de réponses SSR. L’Extended Projection Algorithm (EPA) est l’unique algorithme existant permettant de séparer un mélange de réponses à protocoles mixtes, quoique qu’insatisfaisant. Nous démontrons par des simulations et des données réelles que le critère de minimisation, le « Disjoint Component Analysis » (DCA), résout ce problème de séparation mixte.

Abstract – Secondary Surveillance Radar (SSR) transmits data through two different protocols for their replies, one being a legacy from Second world war. To combat the increasing density of replies, we propose to use an array antenna. The only known algorithm being able to separate both protocols suffer from operational problems, therefore we introduce here a minimization criterion, the Disjoint Component Analysis, that can separate the received mixed replies, as evidenced by simulations and real data analysis.

1 Introduction

Les Radars de Surveillances Secondaires SSR ont été créés lors de la seconde guerre mondiale, et depuis déployés dans le civil avec le protocole mode A/C [1] permettant d’échanger l’identité de l’avion et son altitude. Un nouveau protocole, mode S, a été ajouté depuis afin de permettre plus de communications. Alors que le radar primaire détecte la réflexion sur un avion d’un écho qu’il a transmis, le SSR fonctionne sur un mode de questions-réponses. Les avions possèdent un transpondeur dont le but est de recevoir et répondre aux requêtes du radar secondaire. Utilisant le protocole mode S et la fréquence attribué aux SSR, un nouveau système de sécurité aérienne a été mis en place : l’Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B) [2], ce système de surveillance coopératif fait émettre périodiquement un « squitter », qui est une émission automatique d’une réponse mode S. La mise en place de ce système alliée à l’expansion du trafic aérien provoque une augmentation de la densité de réponses mode S, et donc mène à des situations de superpositions de réponses mode S, « garbling », pour lesquelles les receveurs conventionnels sont inefficaces.

L’architecture proposée en [3], un système distribué d’une station émettrice et de plusieurs receveurs, permet par multilatéralisation une meilleure localisation des avions et plus de robustesse pour l’échange de messages. Les receveurs sont donc des radars passifs, sans synchronisation temporelle. Les transpondeurs ayant une tolérance d’un MHz sur la fréquence porteuse de 1090 MHz, il n’y a pas de synchronisation fréquentielle non plus. Les deux protocoles mode A/C et S coexistent et sont assez différents, voir Figure 1 [4]. Et finalement, afin d’éviter des problèmes de calibration, de couplage, de vieillissement du

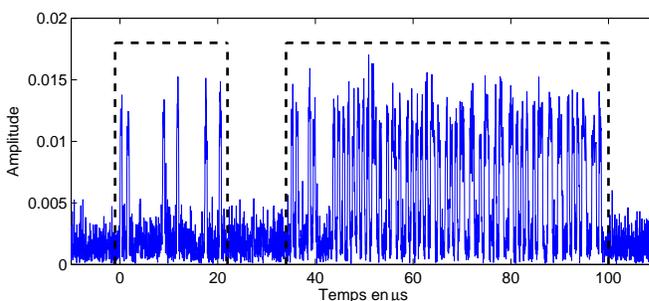


FIGURE 1 – Exemple réel de Mode A/C suivi d’un Mode S

matériel, ou de sensibilité aux conditions opérationnelles, nous travaillons avec des antennes à plusieurs éléments non calibrés [5].

En 1994, Comon résout la séparation de réponse A/C par ICA [6]. Ensuite [7], Van der Veen effectue la séparation de réponses S grâce aux propriétés de « Zero/Constant Modulus », AZCMA. Dans [3], nous poursuivons ces travaux avec une extension (MS-ZCMA) et un algorithme basé sur le « Codage de Manchester » (MDA). Zhou [8] corrige la faiblesse de MDA à grands décalages temporels pour 3 réponses ou plus en mode S superposées, dont [9] présente une simplification robuste (Fold-MDA) à deux réponses S.

Finalement, la séparation de réponses mixtes (A/C + S) est résolue [10] par projections obliques basées sur le non recouvrement des supports temporels des réponses : Extended Projection Algorithm (EPA). Finalement, le critère proposé par Anemüller [11] pour séparer des signaux à supports disjoints et compacts s’applique très bien à la séparation de réponses mixtes, ce que nous montrons dans cet article.

La section suivante présente le modèle des données et le critère DCA. Ensuite une évaluation des algorithmes, par le biais de simulations, est proposée. Enfin une validation des performances est effectuée grâce à des données **réelles** prises à proximité de l'aéroport de Rome.

2 Modèle et Algorithmes

2.1 Modèle de réception

À l'émission, un transpondeur SSR mode A/C renvoie $n = 2 \times 6$ bits d'information séparés par un bit à 0, et entourés de 2 bits de valeur 1, dit « bracket ». Le mode S renvoie $n = 56$ ou $n = 112$ bits codés par un code de Manchester : un bit $b_i = 0$ est codé par un front montant ($\mathbf{b}_i = [0, 1]$), et $b_i = 1$ par un front descendant ($\mathbf{b}_i = [1, 0]$); et précédé par un préambule :

$$\mathbf{b}_{AC} = [1, 0, 0, b_1, 0, 0, \dots, b_6, 0, 0, 1, 0, 0, b_7, \dots, b_{12}, 0, 0, 1]$$

$$\mathbf{b}_S = [1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, \mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \dots, \mathbf{b}_n]$$

de longueur totale $N = \{43, 128, 240\}$. Le préambule/bracket sert à synchroniser en temps le signal reçu (détection du début d'un paquet). Le signal émis est une modulation d'amplitude de \mathbf{b} par un pulse quasi-rectangulaire $p_S(t)$ et à la forme :

$$b_S(t) = \sum_{n=0}^{127/239} \mathbf{b}[n] p_S(t - nT) \quad (1)$$

dont $\mathbf{b}[n]$ est le n ième élément de \mathbf{b}_S ou de \mathbf{b}_{AC} , et $T = 0.5 \mu s$ est la période d'échantillonnage des données.

Pour transmettre le signal, $b(t)$ est multiplié par une porteuse à la fréquence f_e , mais l'Organisation Internationale de l'Aviation Civile [1] permet un biais de ± 1 MHz autour de $f_c = 1090$ MHz. Donc en général $f_e \neq f_c$ et il reste toujours une fréquence résiduelle à la réception après conversion en bande de base. Cette fréquence résiduelle, $f = f_e - f_c$, cause une rotation de phase significative des symboles émis. On reçoit donc après conversion en bande de base : $s(t) = g b(t) \exp(2\pi j f t)$, où g contient la puissance reçue et une phase représentant le délai brut à la réception du premier symbole.

On considère que l'on reçoit d sources indépendantes sur une antenne à m capteurs. Les sources, $s_i(t)$, arrivent au temps τ_i avec un gain g_i . On suppose que l'hypothèse de bande étroite est vérifiée, les retards temporels entre les capteurs sont alors équivalents à des déphasages. Le vecteur bruit est blanc, et ses éléments sont gaussiens, indépendants, identiquement distribués, et ont tous la même variance σ^2 .

Soit un intervalle de temps, L , tel que les paquets émis par chaque source sont complets. Hors des limites du paquet, on considère que les bits émis sont égaux à zéro. On peut donc négliger les temps d'arrivée et considérer les sources reçues comme des versions complétées à zéro des paquets originellement émis, et définir la matrice \mathbf{S} (taille $d \times L$) :

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \boxed{s_1} & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{0} & \boxed{s_d} \end{bmatrix} \quad (2)$$

On a alors classiquement [12] :

$$\mathbf{X} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{S} + \mathbf{N} \quad (3)$$

où \mathbf{X} est la $m \times L$ matrice contenant les signaux reçus sur l'antenne. \mathbf{M} est la matrice $m \times d$ de mélange des sources qui contient la signature spatiale de l'antenne et le gain des sources. \mathbf{N} est la $m \times L$ matrice contenant le bruit.

2.2 EPA et Critère DCA

L'EPA[10] est un algorithme d'extractions itératives de sources : étant donné que les réponses sont à supports compacts disjoints, on cherche un intervalle de temps sur lequel une seule source est présente, cf Eq. 2. On estime le vecteur signature \mathbf{m}_i de cette source sur cet intervalle, puis on projette la matrice reçue sur ce vecteur signature : $\hat{s}_i = \mathbf{m}_i^H \mathbf{X}$, finalement par une orthonormalisation de Gram-Schmidt, on retire les interférences de \hat{s}_i . On arrête l'itération lorsqu'il ne reste plus que du bruit.

Malheureusement, EPA ne peut séparer des sources ayant approximativement le même support temporel. De plus, il a besoin de plusieurs réglages difficiles pour le nombre de réponses au total, le nombre sur un support donné, et le choix du support temporel qui sert à estimer \mathbf{m}_i , ce qui rend l'algorithme sensible au bruit lors de la décision du support de \mathbf{m}_i .

A contrario, le critère DCA (Disjoint Component Analysis) étant non-supervisé, on échappe à ces sources d'erreur. On désire estimer la matrice \mathbf{W} donnant les signaux de sortie au temps k :

$$\hat{\mathbf{s}}[k] = \mathbf{W}^H \mathbf{x}[k] \quad (4)$$

tel que l'« overlap » défini en [11] entre deux sorties, \hat{s}_i et \hat{s}_j soit minimal :

$$o_{ij} = E(|\hat{s}_i| \cdot |\hat{s}_j|) \quad (5)$$

où $E(\cdot)$ est l'espérance mathématique (remplacée pratiquement par une sommation temporelle). Si deux sources ont leurs supports disjoints, alors o_{ij} sera égal à 0. Le critère à minimiser sera la somme de tous les o_{ij} pour $1 \leq i \neq j \leq m$:

$$H(\mathbf{W}) = \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} o_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} E(|\hat{s}_i| \cdot |\hat{s}_j|) \quad (6)$$

sous la contrainte de ne pas converger vers la solution nulle.

La recherche d'une solution analytique étant toujours en cours, nous proposons la méthode ad-hoc suivante : après un blanchiment à l'ordre 2 (SVD), nous minimisons (6) à la P. Common [13] : en ne travaillant que sur deux sorties à la fois, et séquentiellement en parcourant tous les couples (i, j) . La rotation entre les deux sorties se fait avec la version complexe des matrices de Givens [13], et contient donc deux variables indépendantes : $c \in [0, 1]$ et $\phi \in [0, 2\pi[$, le couple minimisant $H(\mathbf{W})$ est trouvé par une recherche exhaustive sur (c, ϕ) .

Le critère (6) permet par construction de séparer des sources qui ont un support disjoint, telle que présenté par l'équation (2), que l'on pourrait considérer comme une parcimonie temporelle. Mais le critère DCA (6) n'a pas de dépendance temporelle, or les réponses SSR contenant au moins 50% de zéros, un couple de réponses contient en moyenne 50% des échantillons avec une seule source présente, ce qui a une permutation temporelle près revient au premier cas.

3 Simulations

On considère deux réponses courtes mode S dont les résiduels fréquentiels sont ± 50 kHz, elles sont reçues sur une antenne à 4 éléments (m), avec des directions d'arrivées de $\{70, 90\}$, soit un nombre de conditionnement pour M de 1.54.

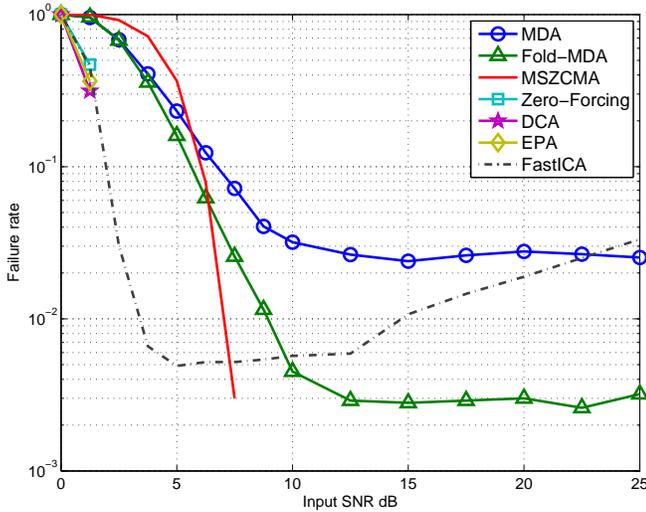


FIGURE 2 – Taux d'échec en fonction du SNR d'entrée.

Premièrement, on varie le RSB des sources en entrée, en conservant un décalage temporel de $30\mu s$ entre les deux sources. On estime qu'une séparation est un échec si le RSIB de sortie est inférieur à 6 dB. La Figure 2 présente le taux d'échec en fonction du RSB. On constate que les deux meilleurs algorithmes sont EPA et DCA. MDA, Fold-MDA, MSZCMA et Fast-ICA [14] ont tous des taux d'échec importants à bas RSB, de plus on constate un effet de paliers pour les deux MDA et Fast-ICA.

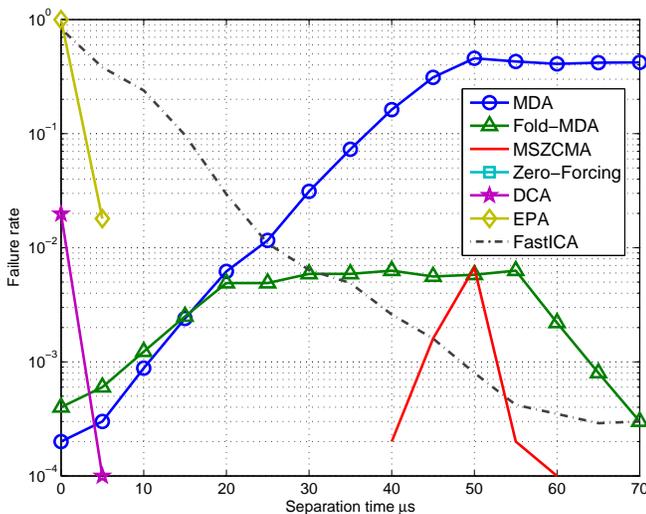


FIGURE 3 – Taux d'échec en fonction du retard temporel.

Deuxièmement, on fixe le RSB d'entrée à 10 dB, et on va-

rie le décalage temporel entre les deux réponses. La Figure 3 présente le taux d'échec en fonction du décalage, dont le point à RSB de 10dB est cohérent avec la Figure 2. On note qu'effectivement Fold-MDA permet de limiter le taux d'échec du MDA pour des grands décalages. Fast-ICA a un taux proche de 1 pour un décalage nul, ce qui est en accord avec [15] : les réponses mode S sont des variables aléatoires pseudo-Gaussiennes et donc ne peuvent être séparées par les Statistiques d'Ordres Supérieures (SOS). De même, EPA ne peut résoudre les réponses avec un décalage nul, car il n'y a pas de support temporel avec une seule source. Finalement, on constate que le critère DCA a un taux d'échec à 2% pour un décalage nul, avant de tendre vers zéro, ce qui en fait le meilleur algorithme. Notons que MSZCMA a aussi de bonnes performances, et un léger pic d'échec autour de $50\mu s$.

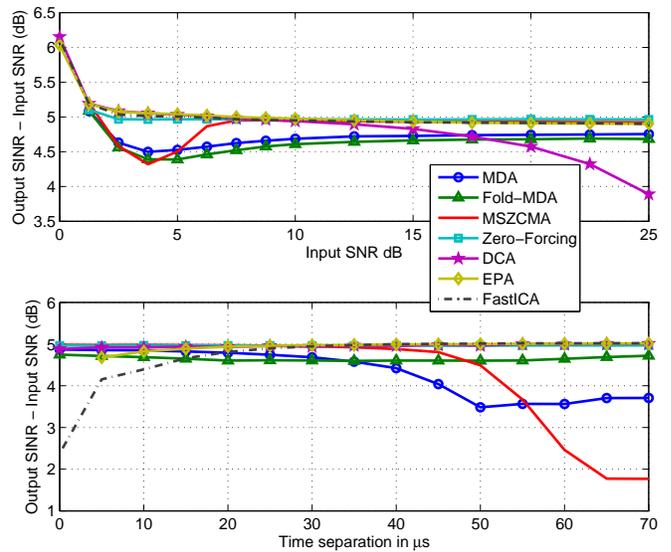


FIGURE 4 – SINR de sortie en fonction du a) SNR d'entrée, b) retard temporel.

La figure 4 présente les RSIB de sortie moins les RSB d'entrée pour les deux simulations. On constate qu'on est proche du maximum théorique, qui est 6 dB pour une antenne à 4 éléments. La Figure (4.a) montre qu'en général toutes les méthodes ont le même RSIB à 0.5 dB près. Identiquement, dans la Figure (4.b), les performances sont identiques, à l'exception de fast-ICA quand le taux d'échec est maximum, et à grand décalage pour MSZCMA et MDA dans un moindre écart.

En conclusion, EPA et DCA sont de bons candidats, et Fold-MDA améliore sensiblement MDA.

4 Données réelles

Nous utilisons les données obtenues par le « Transponder Data Recorder » (TDR [5], Figure 5), réalisé au RADARLAB en collaboration avec l'Université of Calabria. Le TDR est composé d'une antenne planaire de 6 éléments reliés à 4 chaînes de réceptions linéaires ; les deux éléments extrêmes étant placés

pour des raisons de couplage. Les signaux reçus sont transposés à une fréquence intermédiaire de 21.5 MHz, puis échantillonnés à un taux de 100 MHz. Le TDR est placé sur le toit du RADAR-LAB, à 30 km de l'aéroport de Rome.



FIGURE 5 – The TDR antenna

Pendant 10 jours d'enregistrement en Octobre 2016, nous avons obtenu 419 cas de mode S super-imposés. Tous ces cas ont du être confirmés par un opérateur, pour pouvoir évaluer Fold-MDA, EPA, et DCA. La table 1 contient tous les taux de réussite, cas par cas, pour les deux types de mode. Bien que F-MDA ne puisse décoder les mode A/C, il est défini comme référence même si l'on constate qu'il est le moins performant sur les mode S. DCA a au moins 10% de plus que EPA pour la

Case	n_i	F-MDA	EPA S A/C	DCA S A/C
Global	419	0.78	0.79 0.26	0.89 0.81
2 réponses S	335	0.76	0.80	0.89
2 S + 1 A/C	58	0.76	0.84 0.22	0.90 0.79
2 S + 2 A/C	7	0.71	0.57 0.43	0.57 0.86
3 réponses S	13	0.00	0.69	0.54
3 S + 1 A/C	6	0.00	0.50 0.18	0.50 0.82

TABLE 1 – Taux de succes des algorithmes pour les réponses mode S et mode A/C.

détection et le décodage des mode S, et surtout il multiplie la détection des modes A/C en moyenne par 3, ce qui le rend plus complet. La raison étant que : pour qu'EPA sépare un mode A/C, il faut que ce mode A/C soit suffisamment énergétique par rapport aux 2 modes S du mélange, alors que dans le cas du DCA, un mode A/C, même de puissance faible, sera poussé hors des estimateurs des modes S par les rotations successives.

5 Conclusion

Nous démontrons par le biais de simulations et de données réelles que le critère DCA est le plus performant pour la sépa-

ration de réponses de types mixtes de radar SSR reçues sur une antenne. De plus, à contrario de l'EPA, il est non-supervisé. Il est toutefois nécessaire de trouver une implémentation analytique pour remplacer les étapes de recherches exhaustives.

Références

- [1] International Civil Aviation Organisation, *International standards and recommended practices, aeronautical telecommunications : ICAO Doc. 7300/8.I, Annex 10*.
- [2] RTCA : 'DO-260A MOPS for 1090 MHz ES ADS-B and TIS-B', 2003.
- [3] N. Petrochilos and A. J. van der Veen, "Algebraic algorithms to separate overlapping secondary surveillance radar replies," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 55, no. 7 pt.2, pp. 3746–3759, Jul. 2007.
- [4] M.C. Stevens, *Secondary Surveillance Radar*, Artech house, Norwood, MA, 1988.
- [5] G. Galati, M. Leonardi, E. Piracci, N. Petrochilos and S. Samanta, "The transponder Data Recorder : Implementation and first results," *IEEE Aerospace and Electronic Systems magazine*, vol. 29, no. 2, pp. 6–13, 2014.
- [6] E. Chaumette, P. Comon, and D. Muller, "An ICA-based technique for radiating sources estimation ; application to airport surveillance," *IEE Proceedings - Part F*, vol. 140, pp. 395–401, Dec. 1993.
- [7] A. van der Veen and J. Tol, "Separation of zero/constant modulus signals," in *Proc. IEEE ICASSP*, (Munich (FRG)), pp. 3445–3448, Apr. 1997.
- [8] M. Zhou and A. J. van der Veen, "Improved blind separation algorithm for overlapping secondary surveillance radar replies," in *Proc. IEEE CAMSAP*, San Juan, Puerto Rico, pp. 181–184, Dec. 2011.
- [9] N. Petrochilos, EG. Piracci, and G. Galati, "Improved MDA, a case for de-garbling SSR mode S replies," in *Proc. Of ESAV 2014*, pp.87–91, Italy, 2014.
- [10] N. Petrochilos, Gaspare Galati, and Emilio Piracci, "Application of array processing to receiving stations of multilateration systems based on srr signals," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 45, no. 3, 2009.
- [11] J. Anemüller, "Maximization of component disjointness : A criterion for blind source separation," *International Conference on Independent Component Analysis and Signal Separation*, pp. 325–332, 2007.
- [12] Hamid Krim and Mats Viberg, "Two decades of array signal processing research," *IEEE sig. Proc. Magazine*, pp. 67–94, Jul. 1996.
- [13] Pierre Comon, "Independent component analysis, a new concept?," *Signal Processing, Special issue on Higher-Order Statistics*, vol. 36, no. 3, pp. 287–314, Apr. 1994.
- [14] Z. Koldovsky and P. Tichavsky, "Blind Instantaneous Noisy Mixture Separation with Best Interference-plus-noise Rejection", in *proc. ICA*, London, Sept. 2007.
- [15] N. Petrochilos and P. Comon, "A zero-cumulant random variable and its applications," *Signal Processing Magazine*, vol. 86, no. 11, pp. 3334–3338, Nov. 2006.