

Reconnaissance aveugle de codages OSTBC basée sur les propriétés matricielles des statistiques d'ordre 2

Vincent CHOQUEUSE^{1,2}, Ludovic COLLIN^{2,1}, Koffi YAO², Gilles BUREL²

¹Laboratoire E^3I^2 , EA 3876, Ensieta
2, rue Francois Verny, 29806 Brest Cedex 09, France

²LEST UMR-CNRS 6165
6, av le Gorgeu, CS 93837, 29238 Brest Cedex 3, France
choquevi@ensieta.fr, Ludovic.Collin@univ-brest.fr
Koffi-Clement.Yao@univ-brest.fr, Gilles.Burel@univ-brest.fr

Résumé – La reconnaissance aveugle des paramètres d'une communication est une thématique importante dans le contexte des récepteurs auto-configurants et de la guerre électronique. Actuellement, peu de recherches se focalisent sur la reconnaissance aveugle du codage spatio-temporel utilisé dans les communications sans fil multi-émetteurs. Pour caractériser ces codages, nous proposons une nouvelle fonction de contraste basée sur des propriétés matricielles remarquables de statistiques d'ordre 2. L'utilisation de cette fonction de contraste en entrée d'un classifieur SVM permet la reconnaissance automatique du codage. Les performances de notre algorithme sont évaluées pour la reconnaissance de 3 types de codage (multiplexage spatial, codage d'Alamouti et codage OTSBC3 de rendement $\frac{1}{2}$).

Abstract – The blind recognition of communication parameters is an important topic in the domains of auto-configuring receivers and electronic warfare. Currently, few research focus on the blind recognition of space time block code used in multiple transmitters communication. We propose a new contrast function based on the matrix properties of a second order statistic to characterize these codes. This contrast function is used as input of a SVM classifier to automatically recognize the space time block code. The performances of our algorithm is evaluated for the recognition of communications using spatial multiplexing, Alamouti coding or $\frac{1}{2}$ rate OSTBC3 coding.

1 Introduction

Les communications sans fils ont connu un essor particulier ces dernières années. Cet essor provient du développement de la téléphonie sans fil, des réseaux locaux et de la baisse des prix des équipements. En parallèle, l'émergence de nouvelles applications multimédia a fait naître de nouvelles exigences portant sur le débit et la robustesse de ce type de communication. Une des solutions les plus prometteuses pour répondre à ces exigences repose sur l'utilisation de plusieurs antennes à l'émission et à la réception, système que l'on désigne par l'acronyme MIMO pour Multiple Input Multiple Output [1]. Plusieurs antennes utilisées conjointement avec des techniques de codage spatio-temporel permettent d'améliorer la robustesse d'une transmission en exploitant la diversité spatiale du canal de propagation. Parmi les différentes techniques de codage spatio-temporel, les codages en blocs orthogonaux (OSTBC) possèdent la propriété intéressante d'être décodables facilement. Ces types de codes sont au cœur des derniers standards des réseaux sans fil WiFi et WiMax (802.11n, 802.16d, 802.16e).

Dans le contexte des récepteurs auto-configurants ou de la guerre électronique (Communication Intelligence), plusieurs techniques ont été proposées pour reconnaître en aveugle les paramètres d'une communication sans fil

MIMO. Certaines méthodes permettent de reconnaître en aveugle le nombre d'antennes émettrices [2], la durée symbole [3], la modulation [4] [5] et les symboles émis [6] [7] [8]. Toutefois à notre connaissance, la littérature ne compte aucun travail traitant de la reconnaissance aveugle du codage spatio-temporel.

Cet article présente une première méthode de reconnaissance aveugle des codages spatio-temporels en blocs orthogonaux (OSTBC). Dans la section 2, nous présentons le modèle de signal considéré ainsi qu'une nouvelle fonction de contraste permettant la caractérisation du codage spatio-temporel. Dans la section 3, nous présentons un classifieur SVM permettant de reconnaître automatiquement le codage à partir des valeurs de la fonction de contraste. Enfin dans la section 4, nous présentons les performances de classification de notre algorithme.

2 Caractérisation du codage spatio-temporel

2.1 Modèle de signal

Considérons une communication MIMO préalablement synchronisée (durée symbole connue par exemple via la technique proposée dans [3]) et composée de n_t émetteurs

et de n_r récepteurs. Considérons que le canal de propagation, désigné par la matrice complexe \mathbf{H} de taille $n_r \times n_t$, soit invariant dans le temps et non sélectif en fréquence. Les échantillons reçus à l'instant k , désignés par le vecteur colonne Y_k , s'expriment en fonction des symboles émis, désignés par le vecteur colonne X_k , via la relation :

$$Y_k = \mathbf{H}X_k + B_k \quad (1)$$

où B_k est un vecteur colonne de taille n_r qui représente le bruit additif supposé gaussien complexe circulaire. Lorsque la communication utilise un codage spatio-temporel en bloc, les symboles émis X_k à différents instants sont liés par certaines relations. Dans cet article, nous limitons notre étude aux cas suivants :

- *Communications utilisant un multiplexage spatial.* Les symboles émis X_k s'expriment par :

$$X_k = \begin{pmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_{n_t} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Où s_i est un symbole complexe provenant d'une modulation.

- *Communications utilisant un codage d'Alamouti.* Pour un codage d'Alamouti [9], les symboles émis à l'instant k et $k + 1$ sont liés par la matrice bloc (k pair) :

$$[X_k \ X_{k+1}] = \begin{pmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{pmatrix} \quad (3)$$

- *Communications utilisant un codage OSTBC3 de rendement $\frac{1}{2}$.* L'extension du codage d'Alamouti pour un nombre d'émetteurs $n_t \geq 2$ a été présenté par Tarokh [10]. Dans notre cas, nous nous intéressons uniquement au codage OSTBC3 de rendement $\frac{1}{2}$. Pour ce type de codage, les symboles émis entre l'instant k et $k + 7$ sont liés par la matrice bloc (k multiple de 8) :

$$[X_k \ \dots \ X_{k+7}] = \begin{pmatrix} s_1 & -s_2 & -s_3 & s_4 & s_1^* & -s_2^* & -s_3^* & -s_4^* \\ s_2 & s_1 & s_4 & -s_3 & s_2^* & s_1^* & s_4^* & -s_3^* \\ s_3 & -s_4 & s_1 & s_2 & s_3^* & -s_4^* & s_1^* & s_2^* \end{pmatrix} \quad (4)$$

2.2 Etude des statistiques d'ordre 2

Une façon de caractériser en aveugle le codage spatio-temporel d'une communication consiste à mesurer les corrélations spatiales et temporelles des signaux reçus Y_k . Pour mesurer ces corrélations, nous proposons d'utiliser les statistiques d'ordre 2 définies par $\mathbf{R}(\tau) = E[Y_k Y_{k+\tau}^T]$. À noter que nous utilisons la transposée $Y_{k+\tau}^T$ et non la transposée hermitienne. En effet dans la plupart des codages orthogonaux un bloc est composé de symboles à un instant k et de leurs conjugués aux instants suivants. En utilisant l'équation 1, $\mathbf{R}(\tau)$ s'exprime sous la forme :

$$\mathbf{R}(\tau) = E[(\mathbf{H}X_k + B_k)(\mathbf{H}X_{k+\tau} + B_{k+\tau})^T]$$

En utilisant le fait que les symboles émis X_k et le bruit additif B_k sont décorrelés et de moyennes nulles :

$$\mathbf{R}(\tau) = \mathbf{H}E[X_k X_{k+\tau}^T]\mathbf{H}^T + E[B_k B_{k+\tau}^T]$$

Comme le bruit additif est décorréllé temporellement alors $E[B_k B_{k+\tau}^T] = \mathbf{0}$ pour $\tau \neq 0$. De plus, comme le bruit est considéré gaussien complexe circulaire alors $E[B_k B_k^T] = \mathbf{0}$. Finalement, $\mathbf{R}(\tau)$ s'exprime sous la forme :

$$\mathbf{R}(\tau) = \mathbf{H}E[X_k X_{k+\tau}^T]\mathbf{H}^T = \mathbf{H}\mathbf{R}_c(\tau)\mathbf{H}^T \quad (5)$$

Les valeurs théoriques des matrices $\mathbf{R}_c(\tau)$ pour des signaux utilisant un multiplexage spatial, un codage d'Alamouti et un codage OSTBC3 de rendement $\frac{1}{2}$ s'obtiennent respectivement à partir des équations 2,3 et 4. Ces matrices possèdent des propriétés remarquables : elles sont soit nulles, diagonales ou antisymétriques. Pour déduire les propriétés matricielles de $\mathbf{R}(\tau)$ à partir des propriétés de $\mathbf{R}_c(\tau)$, nous utilisons les implications suivantes :

- Si $\mathbf{R}_c(\tau)$ est une matrice nulle alors $\mathbf{R}(\tau) = \mathbf{0}$.
- Si $\mathbf{R}_c(\tau)$ est une matrice diagonale, alors : $\mathbf{R}(\tau) - \mathbf{R}^T(\tau) = \mathbf{0}$. Par abus de langage, nous dirons que la matrice $\mathbf{R}(\tau)$ est symétrique¹.
- Si $\mathbf{R}_c(\tau)$ est une matrice antisymétrique, alors : $\mathbf{R}(\tau) + \mathbf{R}^T(\tau) = \mathbf{0}$. Nous dirons que la matrice $\mathbf{R}(\tau)$ est antisymétrique².

Le tableau 1 expose les propriétés matricielles de $\mathbf{R}(\tau)$ en fonction du codage et du décodage temporel τ . Seules les valeurs de $\tau \geq 1$ pour lesquelles $\mathbf{R}(\tau) \neq \mathbf{0}$ sont exposées.

TAB. 1 – Propriétés de la Matrice $\mathbf{R}(\tau)$ en fonction du codage et du décalage temporel τ .

Code	Symétrique	Antisymétrique
Multiplexage	-	-
Alamouti	-	$\mathbf{R}(1)$
$\frac{1}{2}$ OSTBC3	$\mathbf{R}(4)$	$\mathbf{R}(1), \mathbf{R}(3), \mathbf{R}(5), \mathbf{R}(7)$

En pratique, la matrice $\mathbf{R}(\tau)$ est inconnue. Un estimateur de $\mathbf{R}(\tau)$, notée $\hat{\mathbf{R}}(\tau)$, est donné par la corrélation circulaire suivante :

$$\hat{\mathbf{R}}(\tau) = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^{N-\tau} Y_i Y_{i+\tau}^T + \sum_{i=N-\tau+1}^N Y_i Y_{i-N+\tau}^T \right)$$

Où N est le nombre d'échantillons reçus. Pour détecter le codage spatio-temporel, nous proposons de quantifier les propriétés matricielles de $\hat{\mathbf{R}}(\tau)$.

2.3 Fonction de contraste basée sur les propriétés matricielles de $\hat{\mathbf{R}}(\tau)$

Pour mesurer conjointement la symétrie et l'antisymétrie de $\hat{\mathbf{R}}(\tau)$, nous proposons une nouvelle fonction de contraste $d[\hat{\mathbf{R}}(\tau)]$ définie par l'équation 6

¹Rigoureusement, la propriété de symétrie matricielle nécessite également que les éléments de $\mathbf{R}(\tau)$ soient réels. Dans notre étude, ces éléments sont complexes.

²Même remarque que précédemment

$$d[\widehat{\mathbf{R}}(\tau)] = \log \left(\frac{1 + \|\widehat{\mathbf{R}}(\tau) - \widehat{\mathbf{R}}(\tau)^T\|_F^2}{1 + \|\widehat{\mathbf{R}}(\tau) + \widehat{\mathbf{R}}(\tau)^T\|_F^2} \right) \quad (6)$$

où $\|\cdot\|_F^2$ désigne la norme de Frobenius. La fonction de contraste $d[\widehat{\mathbf{R}}(\tau)]$ possède différentes propriétés :

- Si $\widehat{\mathbf{R}}(\tau) = \mathbf{0}$ alors : $d[\widehat{\mathbf{R}}(\tau)] = 0$
- Si $\widehat{\mathbf{R}}(\tau)$ est symétrique alors

$$d[\widehat{\mathbf{R}}(\tau)] = -\log(1 + 2\|\widehat{\mathbf{R}}(\tau)\|_F^2) \leq 0$$
- Si $\widehat{\mathbf{R}}(\tau)$ est antisymétrique alors

$$d[\widehat{\mathbf{R}}(\tau)] = \log(1 + 2\|\widehat{\mathbf{R}}(\tau)\|_F^2) \geq 0$$

En utilisant les propriétés de $d[\widehat{\mathbf{R}}(\tau)]$ et les résultats théorique du tableau 1, la position et le signe des extrema de la fonction de contraste permet d'identifier le codage spatio-temporel.

3 Classification par Support Vector Machine

La classification automatique du codage spatio-temporel à partir de $d[\widehat{\mathbf{R}}(\tau)]$ peut être réalisée par un outil à apprentissage statistique. Nous proposons d'utiliser des Support Vector Machine (SVM) qui possèdent une bonne faculté de généralisation [11]. Le principe de base des SVM est le suivant. Premièrement, les données en entrée sont projetées dans un espace à haute dimension via une fonction noyau notée \mathcal{K} . Deuxièmement, la classification des données est réalisée en recherchant l'hyperplan qui sépare au mieux les données d'apprentissage provenant de deux classes différentes dans l'espace de projection.

Pour classifier le codage spatio-temporel, nous proposons d'utiliser en entrée du SVM les valeurs de la fonction de contraste $d[\widehat{\mathbf{R}}(\tau)]$ pour $\tau = [1, \dots, 7]$. Les valeurs de $d[\widehat{\mathbf{R}}(\tau)]$ pour $\tau > 7$ n'apportent pas d'informations supplémentaires pour les codages considérés. La base d'apprentissage est générée en prenant 100 exemples de chaque codage. Chaque exemple est réalisé dans des conditions similaires : même rapport signal à bruit et symboles provenant de la même modulation³. Nous avons réalisé plusieurs simulations pour tester les performances des différents noyaux \mathcal{K} . Les simulations ont montré que le noyau gaussien d'ordre 1 offrait de très bons résultats avec un temps d'apprentissage relativement court.

4 Performances

Pour évaluer les performances de notre algorithme de reconnaissance du codage spatio-temporel, nous avons effectué plusieurs simulations de type Monte Carlo. Tous les signaux émis proviennent d'une modulation QPSK (modulation présente dans les standards utilisant des codages en

³En pratique, l'information concernant la modulation peut être obtenue en aveugle via l'algorithme présenté dans [5]. L'information concernant le rapport signal à bruit peut être obtenue via la connaissance de la modulation et l'algorithme MUSIC

blocs orthogonaux). Nous avons évalué les performances de bonne reconnaissance de 3 types de codage spatio-temporel : multiplexage spatial, Alamouti et OSTBC3. Les performances ont été testées dans le cas de canaux non sélectifs et sélectifs en fréquence.

4.1 Cas des canaux non sélectifs en fréquence

Dans le cas d'un canal non sélectif en fréquence, les échantillons reçus s'expriment en fonction des symboles émis via l'équation 1. Dans nos simulations, les matrices de canal \mathbf{H} sont tirées aléatoirement et suivent une loi gaussienne complexe circulaire $\mathcal{N}_c(0, 1)$ (canal de Rayleigh).

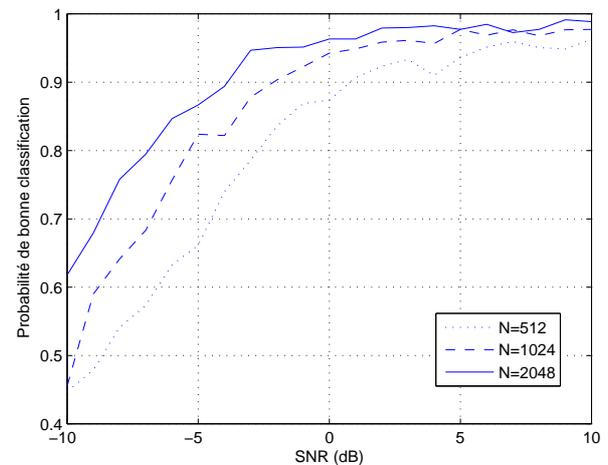


FIG. 1 – Influence du nombre d'échantillons N sur les performances de classification. 2 antennes en réception.

La figure 1 expose les performances de classification de notre algorithme en fonction du nombre d'échantillons reçus et du rapport signal à bruit. Les courbes montrent que plus le nombre d'échantillon est élevé, meilleure est la probabilité de bonne reconnaissance du codage. L'amélioration de la probabilité résulte d'une meilleure estimation de la matrice $\mathbf{R}(\tau)$ lorsque N augmente.

La figure 2 présente les performances de classification en fonction du nombre de récepteurs et du rapport signal à bruit. Plus le nombre de récepteurs est élevé, meilleure est la probabilité de bonne reconnaissance du codage. L'amélioration de la probabilité est due au fait que l'amplitude des pics de la fonction de contraste $d[\widehat{\mathbf{R}}(\tau)]$ augmente avec le nombre de récepteurs.

4.2 Cas des canaux sélectifs en fréquence

Les résultats théoriques concernant la caractérisation du codage présupposent que le canal est non sélectif en fréquence. Nous avons testé l'impact de la sélectivité fréquentielle du canal sur les performances de notre méthode⁴. Dans le cas d'un canal sélectif en fréquence, les échantillons reçus à l'instant k s'expriment en fonction des symboles émis par la relation :

⁴Un apprentissage SVM est réalisé à chaque SNR et à chaque ordre l.

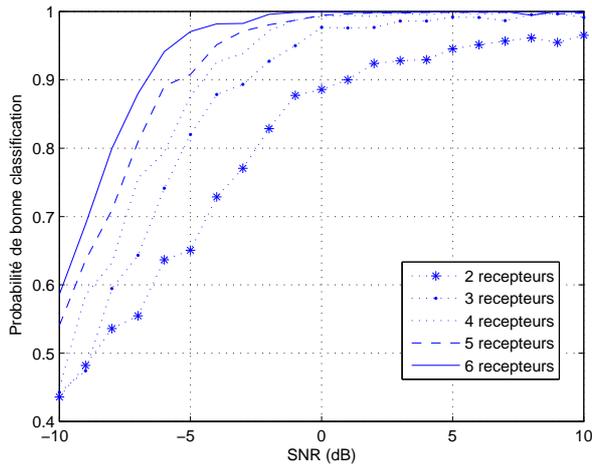


FIG. 2 – Influence du nombre de récepteurs sur les performances de classification. 512 échantillons reçus.

$$Y_k = \sum_{u=0}^l \mathbf{H}_u X_{k-u} + B_k \quad (7)$$

L'ordre l des filtres de propagation est supposé identique pour chaque couple d'antennes émetteur/récepteur. Les coefficients des filtres de propagation à l'ordre u sont désignés par la matrice \mathbf{H}_u (avec $0 \leq u < l$). Dans nos simulations, les coefficients de \mathbf{H}_u suivent une loi gaussienne complexe circulaire $\mathcal{N}_c(0, 1)$.

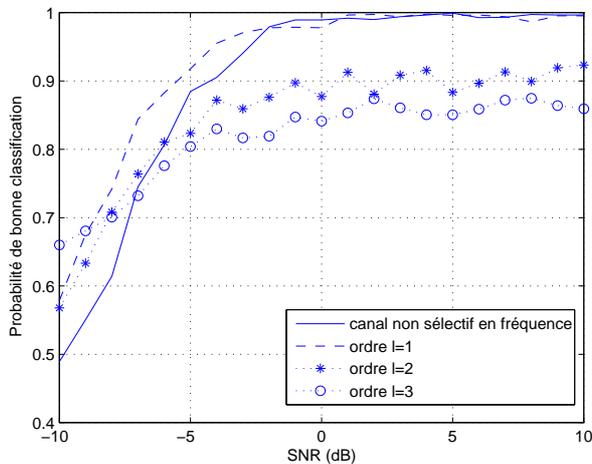


FIG. 3 – Influence de l'ordre l des filtres de propagation sur les performances de classification. 4 antennes en réception et 512 échantillons reçus.

La figure 3 présente les performances de classification lorsque les canaux sont sélectifs en fréquence. Dans le cas des canaux sélectifs en fréquence d'ordre $l = 1$, les performances obtenues sont supérieures à celle obtenues avec des canaux non sélectifs en fréquence. Les matrices de confusion montrent que les canaux d'ordre $l = 1$ permettent de mieux reconnaître les communications utilisant un multiplexage spatial. En augmentant l'ordre des filtres de propagation ($l \geq 2$), les performances se dégradent considérablement. Les matrices de confusion montrent que les com-

munications utilisant un multiplexage spatial ou d'Alamouti sont plus difficiles à distinguer.

5 Conclusion

La méthode présentée dans cet article permet de reconnaître en aveugle le codage spatio-temporel en bloc d'une communication. La caractérisation du codage est basée sur une fonction de contraste qui quantifie les propriétés de symétrie et d'antisymétrie d'une statistique d'ordre 2 des signaux reçus. La reconnaissance du codage est ensuite réalisée par un classifieur de type SVM. Les performances de l'algorithme sont évaluées pour un problème de reconnaissance de trois types de codage : multiplexage spatial, codage d'Alamouti et codage OSTBC3 de rendement $\frac{1}{2}$. Les simulations montrent de très bonnes probabilités de bonne reconnaissance du codage même à faible rapport signal à bruit et lorsque le canal est sélectif en fréquence.

Références

- [1] P. Guguen, G. El Zein *Les techniques multi-antennes pour les réseaux sans fil*, Hermes, 2004.
- [2] S. Marcos, *Les méthodes à hautes résolution : traitement d'antenne et analyse spectrale*, Hermes, 1998.
- [3] S.J Lee, *A New Non Data Aided Feedforward Symbol Timing Estimator Using Two Samples per symbol*, IEEE Communications Letters, vol 6, no 5, pp 205-207, 1993.
- [4] O. Dobre, Y. Bar-Ness, W. Su, *Blind Modulation Classification : A Concept Whose Time has Come*, IEEE Sarnoff, p 223-226, April 18-19, 2005.
- [5] A. Swami, S. Barbarossa, B.M Sadler, *Blind Source Separation and Signal Classification*, IEEE SSC conference, vol 2, p 1187-1191, 2000.
- [6] J. Rinas and K.D. Kammeyer, *MIMO measurements of communication signals and application of blind source separation*, IEEE ISSPIT, p 94-97, December 14-17, 2003.
- [7] J. Liu, A. Iserte, and M. Lagunas, *Blind separation of OSTBC signals using ICA neural networks*, IEEE ISSPIT, p 502-505, December 14-17, 2003.
- [8] S. Shahbazpanahi, A.B. Gershman, and J.H. Manton, *Closed form blind MIMO channel estimation for orthogonal space time codes*, IEEE Transactions on Signal Processing, 53(12), 4506-4517, 2005.
- [9] S.M. Alamouti, *A Simple transmit diversity technique for wireless communication*, IEEE Journal of Selected Areas in Communications, 16(8) 1451-1458, 1998.
- [10] V. Tarokh, H. Jafarkhani, and A.R. Calderbank, *Space time block codes from orthogonal designs*, IEEE Transactions on Information Theory, 45(5) 744-765, 1999.
- [11] V. Vapnik, *The Nature of Statistical Learning Theory*, New York : Springer Verlag, 1995.