
Association du précodage diagonal et des systèmes MIMO dans des environnements fortement corrélés

Kamel Boukantar^{*,} — Charlotte Langlais^{***} — Marion Berbineau^{*,**}**

** Univ. Lille Nord de France, F-59000 Lille, France*

*** INRETS-LEOST, F-59666 Villeneuve d'Ascq, France*

kamel.boukantar@inrets.fr

**** Télécom-Bretagne, Département Electronique, CS 83818, 29238 Brest, France*

RÉSUMÉ. L'intérêt d'utiliser plusieurs antennes en émission et en réception pour les systèmes sans fils a été largement étudié ces dernières années. Ces systèmes connus sous l'acronyme MIMO (Multiple Input Multiple) permettent d'augmenter le débit de la communication et la robustesse du lien de transmission. Les techniques MIMO les plus connues (code d'Alamouti par exemple) considèrent la connaissance des caractéristiques du canal uniquement au niveau récepteur (CSI-R, Receive Channel State Information), cependant, il a été démontré que la prise en compte de cette information au niveau émetteur (CSI-T) permet d'améliorer les performances en offrant une meilleure efficacité spectrale et en réduisant la probabilité d'erreurs. Le bloc en émission qui prend en compte cette information se nomme précodeur. Son but est de pré-traiter les données avant leur transmission dans le canal radio. Les études portant sur les précodeurs sont réalisés dans un premier temps sur des canaux théoriques décorrélé, cependant les performances des techniques MIMO étant fortement détériorées dans des canaux corrélés, nous proposons dans ce papier d'étudier l'association des techniques de précodage avec la technologie MIMO dans des environnements corrélés.

ABSTRACT. The benefits of using multiple antennas at both transmitter and receiver sides in wireless systems are well known today. These systems called Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) systems enable an increase in transmission throughput and robustness. The advantages of MIMO are realizable when the receiver alone knows the channel, nevertheless these are further enhanced when the transmitter also knows the channel. Then transmit CSI can enhance MIMO system performance by increasing the spectral efficiency or reducing the error probability. The exploitation of the CSI-T is made by a processing block named precoder, whose goal is to adapt the data streams before the transmission over the channel. At first, studies on closed-loop MIMO systems are carried out for uncorrelated channel, nonetheless spatial correlation can impact the performances of MIMO systems. So in this paper, we propose to analyze the effect of high correlation on precoding techniques in MIMO systems.

MOTS-CLÉS : Systèmes MIMO, canaux corrélés, précodage diagonal, CSI partielle

KEYWORDS: MIMO systems, correlated channel, diagonal precoder, partial CSI

1. Introduction

Les communications sans fil sont en pleine expansion depuis quelques années. Le domaine des transports n'échappe pas à cette tendance et requiert des transmissions sans fil d'une grande fiabilité et de très haut débit entre le mobile et l'infrastructure. Par conséquent, les systèmes de communications développés pour les transports doivent être résistants à la mobilité, aux interférences et aux multi-trajets présents pendant la transmission. La continuité de service est primordiale, cependant le canal évolue dans le temps et ses caractéristiques sont dépendantes des fluctuations de l'environnement. Pour éviter des dégradations des performances due au caractère dynamique du canal, il est nécessaire d'utiliser des techniques adaptatives en émission. Plus l'évolution du canal est rapide plus le système doit pouvoir s'adapter en conséquence.

Nous considérons dans ce papier la combinaison des techniques MIMO avec les techniques adaptatives dans l'optique d'améliorer les performances des systèmes multi-antennes dans des environnements complexes. Il a été démontré ces dernières années que le fait de considérer la connaissance du canal au niveau émetteur permet d'envisager une amélioration générale des performances. Pour ce faire, les données issues des étages d'émissions sont adaptées au fur et à mesure de la communication grâce à des procédés adaptatifs telles que la modulation, le codage, le précodage ou la sélection d'algorithmes [LOV 08]. Nous proposons dans le cadre de cette étude d'utiliser le précodage diagonal linéaire et d'analyser l'influence de la corrélation à la fois pour un système MIMO de base (boucle ouverte) et pour un système MIMO associé au précodeur (boucle fermée), dans le cas de plusieurs valeurs de la corrélation.

L'article s'articule comme suit. Premièrement, un rappel sur les principes généraux des techniques MIMO ainsi que la modélisation du canal MIMO corrélé est donné. Ensuite une présentation du précodage diagonal est faite. Dans une troisième partie, des résultats de simulations sont proposés et commentés sur l'association des ces deux techniques. Enfin, nous concluons et proposons des perspectives.

2. Les techniques MIMO

2.1. Les systèmes MIMO

Les techniques MIMO utilisées dans des environnements riches en diffuseurs permettent d'améliorer la robustesse et la capacité utile du système comparé aux systèmes SISO (Single-Input Single-Output). La technologie MIMO est aujourd'hui intégrée dans les nouvelles versions des standards de communication sans fil et s'impose comme la technologie la plus apte à répondre aux exigences des communi-

tions radio-mobiles [PAU 04]. Ces techniques n'exigent pas de connaissance du canal au niveau de l'émetteur. Elles peuvent se décomposer en deux grandes familles d'algorithmes qui sont :

- Les codes espace temps en blocs (STBC) introduits initialement par Alamouti [ALA 98] puis généralisés par Tarokh [TAR 98] proposent l'utilisation de codes orthogonaux (O-STBC) pour augmenter la robustesse des communications en offrant un gain de diversité maximal. Pour ce faire, la plupart des STBC, ajoute de la redondance aux flux de données émis.

- Le multiplexage spatial (MS) conduit à l'amélioration de l'efficacité spectrale grâce au gain de multiplexage offert par cette technique. Le principe consiste à diviser le flux de données entrant en plusieurs sous flux puis de les transmettre sur des antennes différentes[FOS 96].

2.2. Modèles du canal MIMO corrélé

Afin de modéliser au mieux le canal de propagation MIMO il est nécessaire de prendre en compte l'effet de la corrélation. En effet dans la pratique les éléments de \mathbf{H} sont plus ou moins corrélés spatialement. La corrélation dépend de l'environnement de propagation, de la polarisation des antennes et de l'espacement entre chaque antenne. Il existe plusieurs modèles pour représenter un canal MIMO corrélé. Le plus utilisé est le modèle de Kronecker dont la principale caractéristique est de décomposer la matrice de corrélation totale en deux matrices de corrélation indépendantes l'une à l'émission Δ_t et l'autre à la réception Δ_r . La matrice du canal corrélé peut être alors générée de la façon suivante :

$$\mathbf{H} = \frac{1}{E\sqrt{[tr(\mathbf{H}\mathbf{H}^H)]}} \Delta_r^{1/2} \mathbf{H}_w \Delta_t^{1/2} \tag{1}$$

Dans la suite du document, nous utilisons le modèle de Kronecker. La corrélation correspondant à deux antennes adjacentes est donnée par la matrice suivante :

$$\Delta_{t,r} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{t,r} & \rho_{t,r}^2 & \cdots & \rho_{t,r}^{N_{t,r}-1} \\ \rho_{t,r} & 1 & \rho_{t,r} & \cdots & \rho_{t,r}^{N_{t,r}-2} \\ \rho_{t,r}^2 & \rho_{t,r} & 1 & \cdots & \rho_{t,r}^{N_{t,r}-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{t,r}^{N_{t,r}-1} & \rho_{t,r}^{N_{t,r}-2} & \rho_{t,r}^{N_{t,r}-3} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

3. Le précodage linéaire

3.1. L'obtention de la CSI-T

Comme mentionné dans l'introduction, il est possible de considérer la connaissance du canal au niveau émetteur afin d'apporter un gain additionnel sur les performances [NAR 98]. Pour cela, il est nécessaire de disposer de l'estimation du canal faite en réception. Cette information peut être obtenue soit par le principe de réciprocité, lorsque la communication s'effectue en full duplex dans un contexte TDD (Time Domain Duplex), soit par l'utilisation d'un lien retour dans un contexte FDD (Frequency Domain duplex). Dans l'article on considère la mise en place d'un lien retour qui devra être à faible débit afin de ne pas consommer la bande passante du lien direct. Il est dans la pratique peu probable de disposer d'une CSI-T parfaite à cause des nombreuses erreurs telles que les erreurs d'estimation, le retard sur le lien retour, les erreurs sur la trame retour et des limitations en termes de ressources spectrales. Une alternative est d'utiliser les informations statistiques du canal telles que sa corrélation ou sa valeur moyenne [VU 06]. L'intérêt est que les statistiques varient moins rapidement que la valeur instantanée du canal de propagation. Par conséquent on considère dans la suite la transmission de la corrélation sur le lien retour.

3.2. Le précodeur diagonal

La plupart des travaux sur les systèmes MIMO à boucle fermée considèrent des précodeurs diagonaux [SAM 01, SCA 02], dont le principe général est de combiner les symboles à émettre et de répartir la puissance sur les antennes selon une stratégie bien précise. L'information sur le canal en émission est utilisée pour diagonaliser le canal via des transformations le plus souvent linéaires telles que la décomposition en valeurs singulières (SVD, Singular Value Decomposition). L'émetteur transmet alors des flux de données indépendants sur les sous-canaux virtuels. Le canal évoluant dans le temps, la poursuite de ses variations temporelles est réduite à la poursuite des valeurs singulières et des vecteurs propres au niveau du récepteur et de l'émetteur. A la réception, un décodeur également linéaire, traite les données reçues. La littérature propose de nombreux précodeurs diagonaux dont la différence repose sur l'algorithme d'allocation de puissances utilisé. En effet, plusieurs critères peuvent être choisis selon le paramètre que l'on veut optimiser. On trouve ainsi les algorithmes basés sur les critères suivants [SCA 02] :

- Maximisation de la capacité (Waterfilling)
- Minimisation de l'erreur quadratique moyenne (MMSE)
- Maximisation de la valeur singulière minimale ($\max-\lambda_{min}$)
- Maximisation de la distance euclidienne minimale ($\max-D_{min}$)
- Maximisation du rapport signal à bruit ($\max-SNR$)

Le schéma synoptique de la figure 1 fait apparaître le positionnement du précodeur \mathbf{F} et du décodeur associé \mathbf{G} dans la chaîne de transmission multi-antennes. Dans le cas d'une CSI parfaite la décomposition SVD est effectuée sur la matrice de canal estimée au niveau de l'émetteur. On obtient alors $\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^H$, avec \mathbf{U} et \mathbf{V} deux matrices unitaires et $\mathbf{\Sigma}$ une matrice diagonale contenant les valeurs singulières de \mathbf{H} . Afin de pouvoir émettre sur des modes propres indépendants et parallèles il est nécessaire et suffisant de choisir $\mathbf{F} = \mathbf{V}$ et $\mathbf{G} = \mathbf{U}^H$ [SAM 02]. Pour obtenir le précodeur optimal selon le critère d'optimisation choisi, on ajoute en plus un bloc d'allocation de puissances tel que, $\mathbf{F}_{opt} = \mathbf{V}\mathbf{\Psi}$, avec $\mathbf{\Psi}$ la matrice d'allocation de puissances.

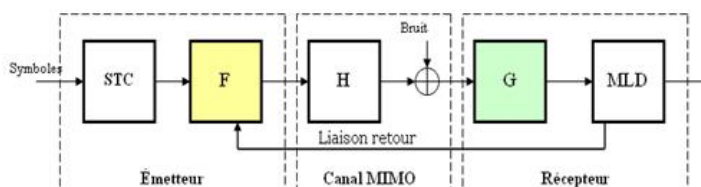


Figure 1. Schéma d'un système MIMO précodé.

Il a été démontré que dans le cas d'une information partielle telle que la corrélation, il est nécessaire et suffisant d'utiliser la décomposition en valeurs propres (EVD) de la matrice de corrélation en émission pour avoir une transmission sur les modes propres de la matrice \mathbf{H} [JAF 04]. Ainsi, on obtient la EVD pour la matrices de corrélation en émission avec la formulation suivante : $\mathbf{\Delta}_t = \mathbf{U}_t \mathbf{\Lambda}_t \mathbf{U}_t^H$. La matrice de précodage optimale est donc : $\mathbf{F}_{opt} = \mathbf{U}_t \mathbf{\Psi}$. La corrélation en réception n'ayant aucune influence sur le choix optimal des modes de propagation, on impose dans la suite $\mathbf{\Delta}_r = \mathbf{I}$, avec \mathbf{I} , la matrice identité. Il est à noter que dans le cas où $\mathbf{\Delta}_r \neq \mathbf{I}$, la corrélation en réception a pour effet d'affecter l'allocation en puissances.

4. Résultats de simulations

Dans cette partie nous présentons des résultats de simulations portant sur l'association du précodage dans systèmes MIMO pour des canaux corrélés. Pour ce faire, nous analysons la combinaison multiplexage spatial avec un précodeur diagonal. Une étude similaire a été réalisée pour un codeur espace temps de type quasi-orthogonal (Q-STBC) dans [BOU 09]. Le multiplexage spatial n'offrant aucun gain de diversité en transmission supplémentaire par rapport à un schéma SISO, cette technique est fortement dépendante du conditionnement de la matrice de canal. Plus l'environnement est corrélé spatialement, plus la matrice de canal est mal conditionnée. Il est donc intéressant de regarder l'apport d'un précodeur sur un tel système MIMO.

Les conditions de simulations sont les suivantes :

- Multiplexage spatial avec 3 émetteurs et 3 récepteurs

- Avec ou sans précodeur diagonal
- Modulateur 2-PSK, 4-PSK
- Canal de Rayleigh et canal corrélé ($\rho = 0, 2; 0, 4; 0, 6; 0, 9; 0, 99$)
- Récepteur à maximum de vraisemblance (MLD)
- Sans codage de canal

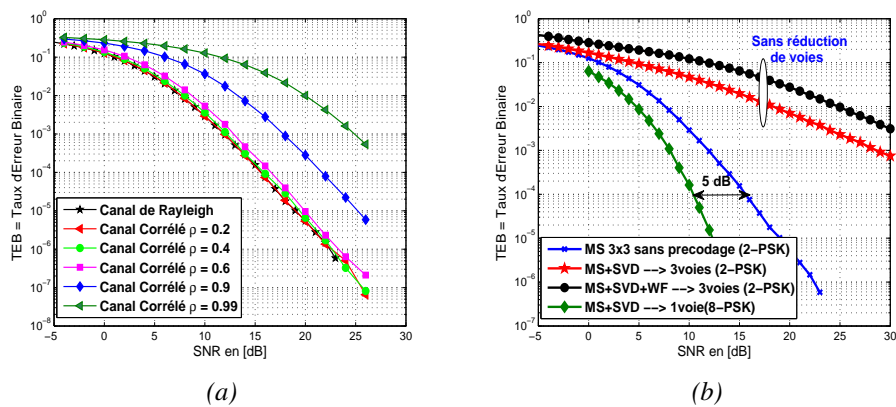


Figure 2. Effet de la corrélation sur du multiplexage spatial sans précodage (a). Association MS-précodage dans un canal de Rayleigh (b)

La figure 2 a) montre l'impact de la corrélation sur un système multiplexé utilisant une modulation 2-PSK. On remarque que la corrélation va détériorer les performances dès lors que le coefficient est supérieur à $\rho > 0, 6$

La figure 2 b) présente l'association MS et précodage dans un canal de Rayleigh. La décomposition matricielle effectuée par la SVD, donne deux modes de propagation indépendants. On constate que si ces deux modes de propagation sont utilisés simultanément (courbes MS+SVD, MS+SVD+WF), le nombre d'erreurs augmente. En effet, pour un système utilisant la SVD avec la même constellation pour chaque sous canal, la probabilité d'erreurs du système est imposée par le sous canal qui présente la plus petite valeur singulière. Il est donc nécessaire de réduire le nombre de voies afin d'améliorer la probabilité d'erreurs. Cependant, le fait de réduire le nombre de voies a pour conséquence d'abaisser l'efficacité spectrale du système. Pour comparer les résultats à même efficacité spectrale on utilise une modulation d'ordre plus élevé, par exemple en gardant une seule voie la modulation 8-PSK est mise en oeuvre. Ainsi les résultats suivants sont donnés pour une même efficacité spectrale de 3 bits/s/Hz. On voit d'après les courbes que le gain amené par le précodeur est essentiellement un gain de diversité avec un léger gain de codage.

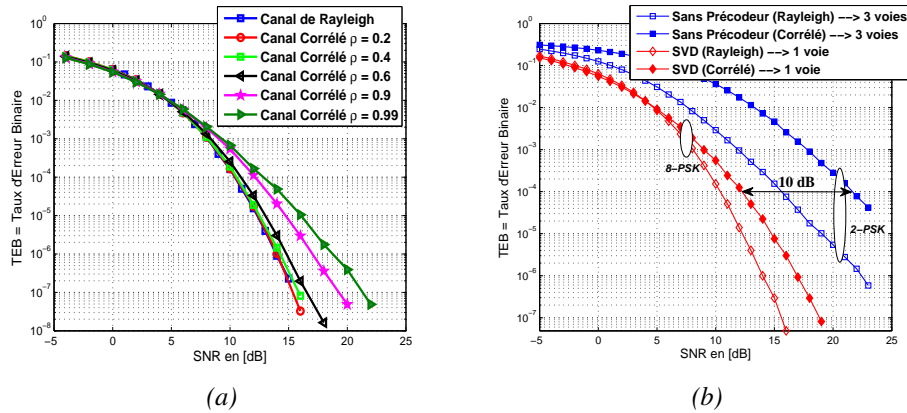


Figure 3. Effet de la corrélation sur du multiplexage spatial avec précodage (a) et bilan sur l'association MS-précodage dans un canal de Rayleigh et corrélé (b)

La figure 3 a) représente l'impact de la corrélation sur un système multiplexé et précodé (SVD uniquement avec réduction de voies) utilisant une modulation 2-PSK. On peut noter que le précodeur permet d'obtenir un gain de diversité. Le précodeur lutte alors contre le mauvais conditionnement de la matrice de canal.

La figure 3 b) représente un système non précodé et précodé dans un canal non corrélé et corrélé ($\rho = 0.9$). L'apport du précodeur est bien visible, notamment avec le fort gain de 10 dB entre le système précodé dans un canal de Rayleigh et le système avec précodage dans un canal corrélé. Quel que soit le type du canal, l'ajout du précodeur à un système MIMO de type multiplexage spatial a pour finalité d'apporter un gain de diversité plus ou moins important (fonction du degré de corrélation) avec un léger gain de codage (translation de la courbe sans précodage vers la droite).

5. Conclusion et perspectives

Nos travaux portent sur l'introduction des précodeurs et décodeurs dans les systèmes MIMO. L'utilisation d'un précodeur n'est possible qu'en prenant en compte la connaissance du canal à l'émission. Cette connaissance *a priori* permet à l'émetteur d'augmenter la diversité en émission du système garantissant ainsi des transmissions robustes. Nous avons présenté l'intérêt d'utiliser un précodeur associé au multiplexage spatial dans le cas d'un canal fortement corrélé ($\rho > 0,6$). Les résultats ont montré que l'ajout du précodeur permet d'offrir un gain de diversité supplémentaire au système et ainsi les performances sont nettement améliorées pour des canaux très corrélés. La suite de nos travaux portera sur l'étude plus approfondie des précodeurs diagonaux et d'un précodeur orthogonal [KIM 08] dont les caractéristiques sont d'orthogonaliser

les flux de données et d'offrir une complexité de calculs moindre par rapport aux précodeurs diagonaux. Cette étude se déroulera dans le cas d'un canal fortement corrélé, avec des erreurs d'estimation et avec des erreurs sur la liaison retour.

6. Bibliographie

- [ALA 98] ALAMOUTI S., « A simple transmit diversity technique for wireless communications », *IEEE. J. Selec. Area Comm.*, vol. 16, n° 8, 1998, p. 1451–1458.
- [BOU 09] BOUKANTAR K., « Performances des systèmes MIMO associés au précodage linéaire », *Acte Journée des Doctorants SPI INRETS*, 2009.
- [FOS 96] FOSCHINI G. J., « Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas », *Bell Labs. Tech.*, vol. 1, 1996, p. 41-59.
- [JAF 04] JAFAR S., GOLDSMITH A., « Transmitter optimization and optimality of beamforming techniques for multiple-antenna systems », *IEEE. J. Wirelless. Comm.*, vol. 3, n° 4, 2004, p. 1165–1175.
- [KIM 08] KIM Y.-T., LEE H., PARK S., LEE I., « Optimal precoding for orthogonalized spatial multiplexing in closed-loop MIMO systems », *IEEE. J. Selec. Area Comm.*, vol. 26, n° 8, 2008, p. 1556–1566.
- [LOV 08] LOVE D., HEATH R., LAU V., GESBERT D., RAO B., ANDREWS M., « An overview of limited feedback in wireless communication systems », *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 26, n° 8, Oct. 2008, p. 1341-1365.
- [NAR 98] NARULA A., LOPEZ M. J., TROTT M. D., WORNELL G. W., « Efficient use of side information in multiple-antenna data transmission over fading channels », *IEEE. J. Selec. Area Comm.*, vol. 16, n° 8, 1998, p. 1423–1436.
- [PAU 04] PAULRAJ A. J., GORE D. R., NABAR U., BOLCSKEI H., « An Overview of MIMO Communications - A Key to Gigabit Wireless », *Proceeding IEEE*, vol. 92, n° 2, 2004, p. 198–218.
- [SAM 01] SAMPATH H., STOICA P., PAULRAJ A., « Generalized linear precoder and decoder design for MIMO channels using the weighted MMSE criterion », *IEEE. J. Comm.*, vol. 49, n° 12, 2001, p. 2198–2206.
- [SAM 02] SAMPATH H., PAULRAJ A., « Linear precoding for space-time coded systems with known fading correlations », *IEEE. J. Comm.*, vol. 6, n° 6, 2002, p. 239–241.
- [SCA 02] SCAGLIONE A., STOICA P., BARBAROSSA S., GIANNAKIS G. B., SAMPATH H., « Optimal designs for space-time linear precoders and decoders », *IEEE. J. Signal Process.*, vol. 50, n° 5, 2002, p. 1051–1064.
- [TAR 98] TAROKH V., SESHADRI N., CALDERBANK A., « Space-time codes for high data rate wireless communication : performance criterion and code construction », *IEEE J. Inf. Theory*, vol. 44, n° 2, 1998, p. 744–765.
- [VU 06] VU M., PAULRAJ A., « Optimal Linear Precoders for MIMO Wireless Correlated Channels With Nonzero Mean in SpaceTime Coded Systems », *IEEE. J. Signal Process.*, vol. 54, n° 6, 2006, p. 2318–2332.