

# Etude des systèmes MIMO pour émetteurs mono-porteuses dans le contexte de canaux sélectifs en fréquence

## Applications aux systèmes de communication opérant dans la gamme HF

### 1 Objet de la thèse.

L'utilisation de systèmes de transmission MIMO (multiple inputs / multiple outputs) pourvus de plusieurs antennes d'émission et de plusieurs antennes de réception permet potentiellement d'augmenter les performances des systèmes de communication sans fils. Il est en effet connu depuis bien longtemps que l'utilisation d'antennes multiples à la réception permet d'augmenter les performances de la chaîne de réception grâce aux gains correspondants en terme de rapport signal sur bruit. Le fait de disposer de plusieurs antennes d'émission peut également être très profitable en terme de performance en réception du fait des effets de diversité de transmission produits. Depuis une dizaine d'années, de nombreux travaux tentent également d'utiliser les systèmes MIMO afin d'augmenter les débits de transmission des systèmes SISO (single input / single output): intuitivement, le fait de disposer de plusieurs antennes d'émission permet d'émettre sur chacune d'entre elles des informations indépendantes qu'il est potentiellement possible d'extraire en réception grâce à un traitement spatial adapté.

D'une façon générale, les systèmes MIMO ont fait l'objet de très nombreuses études dans le cas où le canal de transmission MIMO est non sélectif en fréquence. Dans ce cadre, le vecteur  $\mathbf{y}(n)$  obtenu en échantillonnant le signal reçu à la période symbole sur les antennes de réception peut se mettre sous la forme

$$\mathbf{y}(n) = \mathbf{H}\mathbf{x}(n) + \mathbf{v}(n) \quad (1.1)$$

où  $\mathbf{x}(n)$  est le vecteur transmis sur les antennes de réception,  $\mathbf{v}(n)$  est un bruit additif, et où  $\mathbf{H}$  représente la matrice du canal MIMO. Dans le contexte d'un canal sélectif en fréquence, le modèle (1.1) reste pertinent si l'émetteur utilise des modulations multi-porteuses; dans ce cas, l'équation (1.1) modélise les signaux émis et transmis à une fréquence donnée, et la matrice  $\mathbf{H}$  représente la fonction de transfert du canal de transmission MIMO à la fréquence considérée.

L'un des points les plus étudiés dans le contexte du modèle (1.1) est le problème tout à fait crucial de la conception de l'émetteur, c'est-à-dire la mise en évidence du lien entre le vecteur  $\mathbf{x}(n)$  transmis sur les antennes d'émission et les symboles d'information. Les nombreuses recherches menées dans le domaine du codage spatio-temporel relèvent de cette rubrique, de même que celles qui visent à adapter l'émetteur à d'éventuelles informations a priori sur le canal de transmission (connaissance de la valeur de  $\mathbf{H}$  à l'émission, connaissance de certaines statistiques de  $\mathbf{H}$  à l'émission, ... voir par exemple [3]). Outre le choix de la structure de l'émission, les divers algorithmes de réception et la mise en évidence des meilleurs compromis complexité / performance ont également fait l'objet de nombreux travaux.

Les questions que nous venons d'évoquer sont très nettement moins matures lorsque le canal de propagation est sélectif en fréquence et que l'émission utilise des modulations mono-porteuses. Dans ce contexte, le signal reçu échantillonné  $\mathbf{y}(n)$  se met sous la forme

$$\mathbf{y}(n) = \sum_{l=0}^{L-1} \mathbf{H}_l \mathbf{x}(n-l) + \mathbf{v}(n) \quad (1.2)$$

où  $\mathbf{H}(z) = \sum_{l=0}^L \mathbf{H}_l z^{-l}$  représente cette fois la fonction de transfert équivalent temps discret du canal MIMO. Les résultats et techniques relevant du modèle (1.1) ne sont alors en général plus valables. L'objectif de cette thèse est d'étudier les problèmes de configuration d'émission et les algorithmes de réception correspondants dans le cadre du modèle (1.2) que nous appellerons dans la suite de *modèle MIMO large bande*. Les émetteurs pourront utiliser des modulations linéaires mono-porteuses ou des modulations non linéaires à phase continue (CPM). L'objectif ultime de la thèse est d'évaluer le potentiel des systèmes MIMO dans le contexte de systèmes mono-porteuses opérant dans la gamme HF.

## 2 Sujet proprement dit.

Après une étude bibliographique exhaustive qui devra en particulier faire le point sur les systèmes MIMO utilisant des modulations multi-porteuses, le travail de thèse se déroulera en deux étapes.

### 2.1 Evaluation des performances des systèmes MIMO large bande sans optimisation de l'émetteur et du récepteur.

Afin de mettre en évidence l'utilité de techniques d'optimisation de l'émetteur et du récepteur, la première phase du travail consistera à évaluer les performances potentielles d'un système MIMO large bande basique. Le cas où l'émetteur emploie des modulations linéaires sera distingué de celui où des modulations CPM sont utilisées.

**L'émetteur emploie des modulations linéaires.** Dans un premier temps, les données  $\mathbf{x}(n)$  émises seront supposées coïncider avec les symboles à transmettre. Il conviendra de se donner un ou plusieurs modèles pertinents précisant la structure statistique des matrices  $(\mathbf{H}_l)_{l=0,\dots,L}$ . Le modèle le plus populaire est à cet égard celui qui est introduit dans [1], et qui peut être interprété comme une généralisation large bande du célèbre modèle de Kronecker: les  $(\mathbf{H}_l)_{l=0,\dots,L}$  sont des réalisations de matrices aléatoires Gaussiennes mutuellement indépendantes données par

$$\mathbf{H}_l = \mathbf{R}_l^{1/2} \mathbf{H}_{iid,l} \mathbf{T}_l^{1/2}$$

$\mathbf{H}_{iid,l}$  est une matrice aléatoire Gaussienne à entrées indépendantes identiquement distribuées, et  $\mathbf{R}_l$  et  $\mathbf{T}_l$  sont des matrices de covariance déterministes dues à une corrélation au récepteur et à l'émetteur respectivement. Afin d'évaluer les performances du système MIMO, des indicateurs de performance classiques seront tout d'abord évalués, et l'influence des propriétés statistiques du canal sera étudié. Dans la mesure du possible, des expressions analytiques approximant ces indicateurs devront être mises en évidence car cela s'avérera utile dans la deuxième phase du travail. A titre d'exemple, la capacité ergodique du canal  $\mathcal{C}$  sera considérée.  $\mathcal{C}$  est définie par

$$\mathcal{C} = \mathbb{E}_{\mathbf{H}} \left( \int_{-1/2}^{1/2} \log \det(\mathbf{I} + \rho \mathbf{H}(e^{2i\pi f}) \mathbf{H}(e^{2i\pi f})^*) df \right)$$

où  $\mathbb{E}_{\mathbf{H}}$  désigne l'opérateur d'espérance mathématique par rapport aux matrices  $(\mathbf{H}_l)_{l=0,\dots,L}$  et où  $\rho$  représente le rapport signal sur bruit. Cette quantité étant extrêmement complexe, elle devra être approximée en utilisant, par exemple, des techniques provenant du domaine des grandes matrices aléatoires (voir par exemple le récent article [4]). La capacité ergodique représente le débit maximum que l'on peut atteindre lorsque l'on utilise au niveau du récepteur un détecteur du maximum de vraisemblance des symboles transmis. Ce type de détecteur étant en général trop complexe dans le contexte des modèles MIMO large bande, d'autres indicateurs plus pertinents seront évalués, comme la capacité du système obtenu lorsque l'on impose au récepteur de détecter les symboles transmis en les estimant au préalable à partir du signal reçu par un estimateur de Wiener. Ce type d'indicateur peut également être approximé grâce à des techniques de grandes matrices aléatoires (voir par exemple [2] pour des résultats préliminaires). Ces indicateurs étant d'une nature quelque peu théorique, des taux d'erreurs associés à l'estimateur de Wiener des symboles transmis seront également évalués par simulation de Monte-Carlo. Les coefficients  $(\mathbf{H}_l)_{l=0,\dots,L}$  seront supposés parfaitement connus ou estimés grâce à une séquence pilote.

Les indicateurs de performance précédents seront par ailleurs évalués sur des canaux réels fournis par Thalès-Communications, et obtenus à l'occasion de campagnes de mesures très récentes. Le canal de propagation MIMO dans la gamme HF étant très mal connu, ce dernier point apportera une plus value importante au résultats obtenus pendant la thèse.

Dans un deuxième temps, les données  $\mathbf{x}(n)$  transmises par les antennes de réception seront supposées être générées par un code spatio-temporel (Alamouti, Golden Code par exemple) classiquement utilisé dans le contexte des systèmes MIMO bande étroite définie par (1.1). Les performances de ces codes seront évaluées en utilisant les indicateurs précédents dans le contexte large bande de façon à se faire une idée de leurs avantages et inconvénients.

**L'émetteur emploie des modulations CPM.** Les points étudiés dans le cas des modulations linéaires seront repris dans le contexte des modulations CPM. Le signal  $\mathbf{x}(n)$  sera supposé coïncider avec les valeurs prises par les signaux CPM transmis sur les antennes d'émissions aux multiples de la période symbole. Le signal  $\mathbf{x}(n)$  sera donc corrélé

temporellement dès que l'indice de modulation des signaux transmis est différent de  $1/2$ , et il conviendra d'en tenir compte dans l'étude des performances qui sera entreprise.

## 2.2 Etude de diverses optimisations.

La deuxième phase du travail consistera à mettre en évidence des techniques permettant d'améliorer les performances évaluées dans la première phase.

**Optimisation de l'émetteur.** Lorsque l'émetteur dispose d'informations a priori sur le canal, il est possible d'optimiser sa structure. Le cas où les statistiques du canal sont disponibles à l'émetteur sera considéré en priorité car il est particulièrement pertinent dans le cas de systèmes mobiles. Dans ce contexte, il est classique d'optimiser l'émetteur en déterminant les statistiques du second ordre de la séquence  $\mathbf{x}(n)$  maximisant divers indicateurs. Dans un premier temps, on s'intéressera à des signaux  $\mathbf{x}(n)$  blancs temporellement. Il s'agira alors de déterminer la matrice de covariance des données  $\mathbf{x}(n)$ . Les indicateurs introduits précédemment seront considérés, et des algorithmes d'optimisation seront proposés et comparés. Le cas où les statistiques de canaux sont estimées sera également testé. Dans un deuxième temps, la pertinence d'utiliser des signaux  $\mathbf{x}(n)$  corrélés temporellement sera évaluée. Enfin, la mise en évidence de codes spatio-temporels adaptés au modèle large bande sera étudiée.

**Optimisation du récepteur.** Les estimateurs de Wiener des symboles sont relativement simples à mettre en oeuvre mais leurs performances sont connues pour être relativement peu satisfaisantes. Diverses structures basées sur des techniques d'annulation d'interférences seront testées et optimisées dans le contexte des systèmes MIMO large bande.

## Références

- [1] Bolcskei, H.; Gesbert, D.; Paulraj, A.J., "On the capacity of OFDM-based spatial multiplexing systems", *IEEE Transactions on Communications*, Volume 50, Issue 2, Feb. 2002 Page(s):225 - 234.
- [2] Artigue, C; Loubaton, P; Mouhouche, B, "On the ergodic capacity of frequency selective MIMO systems equipped with MMSE receivers: an asymptotic approach", à paraître dans les actes de Globecom 2008, téléchargeable à l'adresse <http://www-syscom.univ-mlv.fr/~loubaton>.
- [3] A. Goldsmith, S.A. Jafar, N. Jindal, S. Wishwanath, "Capacity limits of MIMO channels", *IEEE Journal on Selected Areas on Communications*, Invited paper, vol. 21, no. 5, pp. 684-702, June 2003.
- [4] Moustakas, A.L.; Simon, S.H., "On the Outage Capacity of Correlated Multiple-Path MIMO Channels", *IEEE Transactions on Information Theory*, Volume 53, Issue 11, Nov. 2007 Page(s):3887 - 3903.
- [5] Oyman, O.; Nabar, R.U.; Bolcskei, H.; Paulraj, A.J., "Characterizing the statistical properties of mutual information in MIMO channels" *IEEE Transactions on Signal Processing*, Volume 51, Issue 11, Nov 2003 Page(s):2784 - 2795.