

Performances des techniques de diversité de polarisation dans les systèmes MIMO massifs

Polarization Diversity Performance in massive MIMO systems

Frédéric Challita¹, Pierre Laly¹, Davy P. Gaillot¹, Martine Liénard¹, Pierre Degauque¹, Marwan Yusuf², Wout Joseph², Emmeric Tanghe²

¹Université de Lille, IEMN/TELICE, {frederic.challita}@univ-lille.fr

²Université de Gand, IMEC {wout.joseph}@ugent.be

Mots clés : MIMO massifs, diversité de polarisation, corrélation spatiale. Massive MIMO, polarization diversity, spatial correlation, Industry 4.0, 5G

Résumé/Abstract

L'objectif de cette contribution est d'étudier les possibilités offertes par la diversité de polarisation dans les systèmes MIMO massifs, pouvant ainsi mener à une diminution de la taille géométrique du réseau, évitant entre autre, la non-stationnarité spatiale sur celui-ci. Les performances des différentes approches possibles sont comparées théoriquement entre elles et exprimées en termes de capacité totale théorique ("sum-rate capacity"). Pour cela, des mesures de matrices de transfert du canal ont été menées dans un hall industriel, les applications visées dans cet article concernant essentiellement l'industrie 4.0. Les valeurs des éléments de ces matrices servent de données d'entrée dans le calcul de la capacité permettant ainsi d'optimiser les techniques de diversité et de quantifier leur apport.

This paper describes a possible way of using polarization diversity in massive MIMO systems, thus leading to a decrease of the size of the array. The predicted gain in terms of sum-rate capacity is compared to that obtained without diversity, assuming well-known precoding techniques. To achieve this goal, measurements of channel transfer matrices have been carried out in an industrial hall, typical of an industry 4.0 environment. Their values are then used as an input for optimizing the diversity scheme and for quantifying its performances.

1 Introduction

Afin d'assurer des communications haut débit entre une station de base, que nous noterons BS pour simplifier, et un grand nombre d'utilisateurs (UE), les techniques dites « MIMO massifs » (Multiple Input Multiple Output) ont été largement étudiées. Comme, typiquement, un réseau massif implanté à la BS comporte une centaine d'éléments, les avantages attendus de cette technique ont trait notamment à : la diminution des interférences entre utilisateurs, une efficacité spectrale élevée et des gains de réseaux importants. Il en résulte une grande fiabilité des liens montants et descendants, ainsi qu'une possibilité de focaliser l'énergie dans des petites régions de l'espace. De plus, l'augmentation du nombre d'antennes procure une meilleure orthogonalité entre canaux.

Cependant les performances des MIMO massifs dépendent des caractéristiques globales des canaux et notamment des corrélations entre les canaux des différents UEs. Par exemple, dans le cas d'une liaison en vue directe (LOS, Line of Sight), une corrélation importante mènera à une forte diminution de la capacité totale du canal (« sum-rate capacity »). Pour pallier ce problème, tout au moins en partie, nous avons proposé une nouvelle stratégie d'allocation des antennes de la BS, basée sur la diversité de polarisation [1]. Les exemples que nous présenterons se rapportent à des liaisons à l'intérieur de bâtiments et notamment en environnement industriel, dans le cadre de l'industrie 4.0 [2].

Nous présentons tout d'abord la configuration géométrique de l'environnement dans lequel les mesures ont été effectuées ainsi que les caractéristiques du système de mesure. Nous exploiterons ensuite les résultats de ces mesures afin d'en déduire les propriétés statistiques des canaux de propagation et notamment les facteurs de dépolarisation et de corrélation entre ces canaux. La méthode proposée basée sur une diversité de polarisation et utilisant, pour le réseau massif, des antennes à double polarisation, est ensuite décrite, les canaux mesurés servant de données d'entrée pour évaluer ses performances.

2 Description de l'environnement et du principe de mesure

Les mesures ont été effectuées dans un grand hall industriel de dimensions 21.3x77.2x12.2 m³. Les diverses parois de ce hall sont en béton, une large porte métallique située à l'extrémité du hall est restée fermée durant toute la période de mesures. De nombreuses structures métalliques sont présentes au sein du hall et correspondent soit à des machines outils, soit à des systèmes de mesure et de test que l'on peut trouver dans des ensembles automatisés associés à l'industrie 4.0. La Figure 1a permet de se rendre compte de la configuration de l'environnement vue de l'antenne d'émission (Tx). Le récepteur (Rx) est déplacé au niveau du rez de chaussée du bâtiment en K=15 positions successives et se trouve donc dans des situations LOS ou NLOS (Non-LOS). A titre d'exemple, La Figure 1b montre une position de Rx en configuration NLOS.



Figure 1 : a) Configuration du hall vue de l'antenne d'émission; b) Antenne de réception en situation NLOS

Les 15 positions successives de Rx sont indiquées sur la Figure 2 [1].

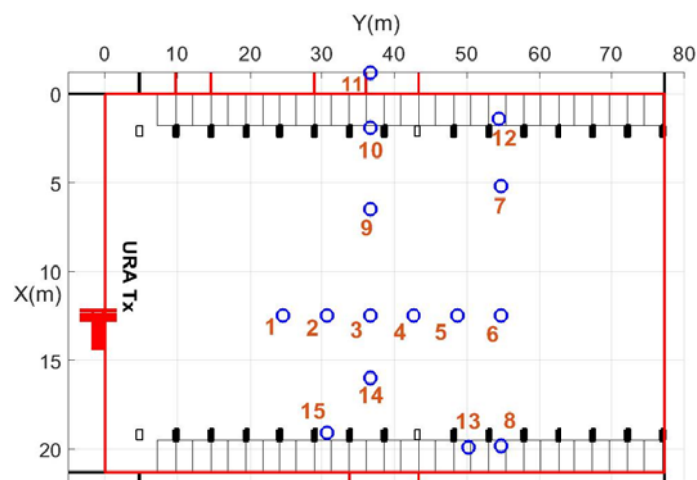


Figure 2 : Positions successives de l'antenne de réception

Lors des mesures, 3 fréquences ont été envisagées : 1.35, 3.5 et 6 GHz et pour ces 3 cas, des antennes planaires (patches) à simple polarisation ont été utilisées. La direction de polarisation du patch en réception est verticale, celle du patch d'émission étant soit verticale, soit horizontale, le changement de polarisation s'effectuant par simple rotation du patch. Le réseau massif a été simulé par un réseau virtuel, le patch étant déplacé dans le plan vertical grâce à un moteur pas à pas piloté par le dispositif de mesure. Des mesures préliminaires en chambre anéchoïque ont montré que la réjection entre des mesures en polarisation et verticale est de 25 dB.

Pour la fréquence la plus basse de 1.35 GHz, ce réseau virtuel est rectangulaire et de dimensions 5x10 (50 éléments). Pour les 2 autres fréquences, le réseau est carré et comporte 100 éléments. L'espacement entre les éléments de ce réseau virtuel est d'environ $\lambda/2$, λ étant la longueur d'onde de la fréquence centrale. Les mesures des fonctions de transfert entre Rx et les divers éléments de Tx sont effectuées à l'aide d'un analyseur de réseau dans 80 MHz de bande. Cet analyseur étant placé à proximité de Tx, un de ses ports est relié à Rx par l'intermédiaire d'une fibre optique et d'un convertisseur électro-optique, la distance Tx-Rx pouvant atteindre 60 m.

3 Caractéristiques statistiques des différents canaux

Dans une première étape, les configurations LOS et NLOS qui ont été choisies correspondent à la position du Rx notée respectivement 1 et 11 sur la Figure 2. Le facteur de discrimination en polarisation croisée (XPD) qui sera présenté, a été calculé pour une fréquence de 3.5 GHz.

Les différentes valeurs de XPD sont celles déduites de la valeur moyenne de la puissance reçue dans la bande des 80 MHz mais calculées pour chaque lien entre un UE et une des antennes du réseau virtuel. Pour cette fréquence de 3.5 GHz, le réseau étant de taille 10x10, on obtient ainsi 100 valeurs du XPD, dont l'étalement traduit la non stationnarité des caractéristiques des canaux sur la surface du réseau. La Figure 3 montre la fonction cumulative de distribution (cdf) du XPD ainsi obtenue. On remarque que la valeur médiane de XPD est de 7 dB en NLOS et de 17 dB en LOS.

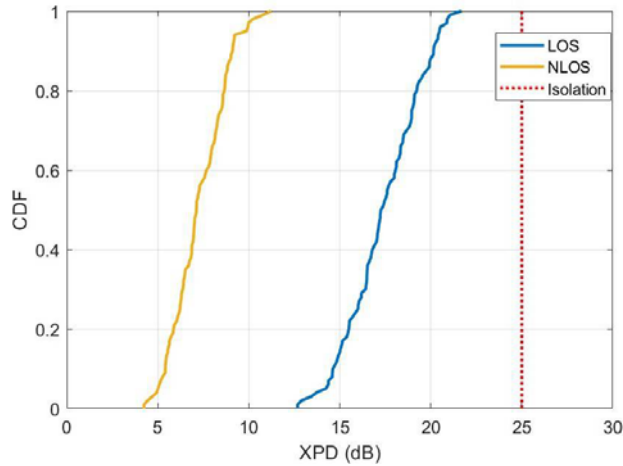


Figure 3. Fonction cumulative de distribution du facteur de discrimination en polarisation croisée

Signalons enfin que l'atténuation supplémentaire moyenne que présente l'ensemble des configurations NLOS par rapport aux configurations LOS est d'environ 15 dB.

Une autre caractéristique importante des canaux MIMO massifs est la matrice de corrélation spatiale en réception \mathbf{R}_{rx} qui traduit la corrélation entre les différents UEs. Pour simplifier la présentation des figures, choisissons un exemple correspondant à un réseau de 32 éléments à double polarisation. Les Figures 4a et 4b indiquent la valeur moyenne des éléments de \mathbf{R}_{rx} si les orientations des antennes de Tx et de l'UE correspondent respectivement à une liaison en situation de co-polarisation (co-polar), verticale dans notre cas, ou de cross polarisation (X-polar).

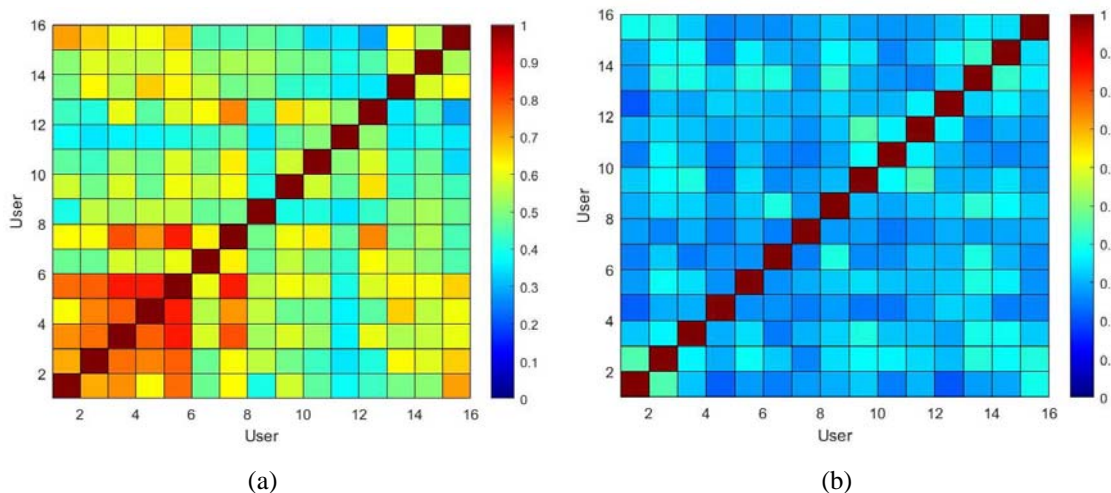


Figure 4. Valeurs des éléments de la matrice de corrélation spatiale \mathbf{R}_{rx} les antennes Tx et Rx étant toutes, soit co-polarisées (a) soit en polarisation croisée (b)

Tout d'abord, si toutes les antennes sont co-polar, la corrélation entre les UEs qui sont en condition LOS et numérotés de 1 à 7 sur la Figure 2, est beaucoup plus grande que celle pour les UEs en NLOS (8 à 15). De plus,

la comparaison entre les Figures 4a et 4b montre que la corrélation décroît rapidement en utilisant des antennes en X-polar plutôt qu'en co-polar, mais au prix d'une diminution de la puissance reçue, compte tenu des valeurs de XPD indiquées précédemment.

4 Diversité de polarisation : principe et performances

Pour aboutir donc au meilleur compromis entre corrélation et perte de puissance, nous proposons d'utiliser, pour le réseau massif, des antennes à double polarisation. L'idée de base de la méthode consiste à choisir, pour chaque UE, une liaison co-polar ou X-polar en fonction de la corrélation que présente ce canal avec ses proches voisins. Les K UEs seront ainsi divisés en 2 groupes K_{co} et K_x , pour lesquels les liens s'effectueront respectivement en co- et X-polar. L'affectation d'un UE à l'un ou l'autre groupe, est faite à partir des caractéristiques de la matrice de corrélation entre canaux, mesurée lors d'une phase d'initialisation [1].

Diverses stratégies d'allocation des polarisations ont été étudiées mais nous nous limiterons dans ce résumé à l'une d'entre elles. Celle-ci consiste à affecter des polarisations différentes à 2 liens, entre Tx et un premier UE repéré par son indice i et entre Tx et un autre UE d'indice j , si et seulement si le coefficient de corrélation $\rho_{i,j}$ est supérieur à un seuil de valeur donnée, ρ_{th} . Des études paramétriques ont montré que la valeur optimum de ρ_{th} est de 0.75. Avec cette approche, ce seront donc surtout les liens en LOS qui utiliseront une transmission en X-polar car ils présentent une corrélation beaucoup plus élevée que pour les liens NLOS.

Pour quantifier la performance de cette méthode sur un exemple, la capacité totale des liaisons décrites dans les paragraphes 2 et 3 a été calculée en envisageant 2 précodages linéaires : MRT (Maximum Ratio Transmission) ou Zero-Forcing (ZF) et en supposant que le réseau massif est constitué de 50 antennes à double polarisation. La fréquence d'émission est de 3.5 GHz et le rapport signal sur bruit moyen lorsque les antennes sont co-polar est de 20 dB. La capacité ainsi obtenue peut être comparée dans le tableau 1 à celle calculée en supposant que tous les liens ont une polarisation soit co-polar, soit X-polar. Le nombre d'éléments du réseau est, dans ce dernier cas, égal à 100 pour que le nombre de ports d'entrée sur le réseau soit identique.

Precodage	Co-polar	X-polar	Diversité
MRT	9	21	12
ZF	100	67	96

Tableau 1 : Capacité totale (bps/Hz) pour 2 types de précodage linéaire et en supposant que tous les liens s'effectuent dans des conditions co-polar, X-polar ou avec diversité de polarisation

Ce tableau montre tout d'abord que la polarisation croisée permet d'atteindre, avec le MRT, des performances supérieures à celle d'une co-polarisation, malgré la diminution de la puissance reçue. Cependant, les résultats avec le MRT restent notablement inférieurs à ceux du ZF. Comme le ZF tend à minimiser les interférences entre utilisateurs, les meilleurs résultats sont obtenus en co-polar, la puissance reçue étant plus importante dans ce cas. On remarque que la diversité de polarisation permet d'atteindre des performances comparables, en termes de capacité, à celles obtenues en utilisant des canaux soient tous co-polarisés soit tous en polarisation croisée.

Un des avantages de cette technique est qu'elle permet de diviser d'un facteur 2 la taille du réseau, minimisant ainsi sa non-stationnarité spatiale.

Pour conclure, rappelons que ce seront surtout les liaisons en LOS qui seront en polarisation croisée. Il en résultera que le rapport signal sur bruit moyen sera du même ordre de grandeur pour tous les liens. En effet l'atténuation supplémentaire pour les liens NLOS en co-polar à une valeur très voisine du XPD qui s'appliquera aux liaisons LOS.

Références bibliographiques

[1] F. Challita, P. Laly, D. P. Gaillot, M. Liénard, P. Degauque, M. Yusuf, W. Joseph and E. Tanghe, "Massive MIMO communication strategy using polarization diversity for industrial scenarios," IEEE Antennas and Wireless Propag. Letters, à paraître, 2020

[2] E. G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, and T. L. Marzetta, "Massive MIMO for next generation wireless systems," IEEE Commun. Mag., vol. 52, no2, pp. 186–195, February 2014