

Intégration de précodeurs pour MIMO coopératif dans un réseau de capteurs

Ghadir MADI, Baptiste VRIGNEAU, Anne-Marie POUSSARD, Rodolphe VAUZELLE

XLIM-SIC UMR-CNRS 6172, Université de Poitiers

Téléport 2, Bd Marie et Pierre Curie, BP 30179 86962 Futuroscope Cedex, France

madi, vrigneau, poussard, vauzelle@sic.univ-poitiers.fr

Résumé – Dans les réseaux de capteurs, la consommation d'énergie représente une contrainte très forte. Nous considérons un système MIMO coopératif basé sur 2 précodeurs MIMO $\max-d_{\min}$ et P-OSM afin de réduire la consommation d'énergie. Ces précodeurs nécessitent la connaissance du canal à l'émission (CSI). Nous proposons plusieurs schémas coopératifs qui permettent de mettre en place les 2 précodeurs avec un canal de retour limité à 7 bits afin de rendre l'utilisation de la CSI réaliste. Enfin, nous évaluons et analysons la consommation d'énergie et le délai de transmission en prenant comme référence le système MIMO coopératif à codes spatio-temporels (STBC).

Abstract – Energy-efficient data transmission is one of the key factors for wireless sensor networks. We consider a cooperative MIMO scheme based on 2 precoders ($\max-d_{\min}$ and P-OSM) to reduce the energy consumption. These precoders require the knowledge of the channel state information (CSI) at the transmitter side. Energy-efficient cooperative schemes are proposed for these precoders based on a quantification of the feedback information where 7 bits are only sent in the feedback channel. We evaluate the energy consumption and transmission delay of these schemes compared to the cooperative MIMO STBC-based scheme in the literature.

1 Introduction

Les réseaux de capteurs ont de nombreuses perspectives d'utilisations dans des domaines variés et leur déploiement demande des nœuds autonomes en énergie. Par conséquent, la réduction de la consommation d'énergie afin d'augmenter la durée de vie du réseau représente une contrainte importante. D'autre part, les systèmes MIMO ont été largement étudiés pour leur potentiel à augmenter considérablement les performances des systèmes de transmissions sans fil mais une application directe n'est pas possible à cause de la taille limitée des capteurs. Cependant, les nœuds peuvent coopérer pour afficher une entité multi-antennaire et réaliser une transmission MIMO. Plusieurs études ont montré qu'un système MIMO coopératif basé sur le code d'Alamouti ou STBC consomme moins d'énergie qu'un système SISO malgré le surcoût de l'opération coopérative [1, 2]. Dans cet article, notre objectif est d'exploiter au mieux le système MIMO coopératif en appliquant des nouvelles techniques MIMO basées sur deux précodeurs, le $\max-d_{\min}$ [3] et le P-OSM [4, 5], qui nécessitent la connaissance du canal à l'émission (CSI) contrairement aux STBC. Ces précodeurs exploitent la CSI pour améliorer les performances en optimisant un critère pertinent. Dans notre cas, la distance minimale de la constellation à la réception (d_{\min}) est maximisée. Néanmoins, la mise en place des précodeurs est plus compliquée que les STBC à cause des étapes supplémentaires nécessaires à la CSI. En effet, après avoir estimé le canal à la réception, l'information doit être envoyée à l'émission par un canal de retour. Dans les réseaux de capteurs, cette solution a été déjà considérée dans plusieurs contextes [6, 7, 8]. Ce papier évalue la consommation d'énergie et le délai dans un système MIMO coopératif basé sur les précodeurs $\max-d_{\min}$ et P-OSM.

2 Quantification de la voie de retour

Nous considérons un système MIMO avec n_t antennes d'émission et n_r antennes de réception. La matrice de canal \mathbf{H} ($n_r \times$

n_t) est modélisée par le modèle de Rayleigh et invariante par paquet. Le récepteur estime la matrice de canal \mathbf{H} et utilise cette estimation pour calculer l'information de retour. Dans les réseaux de capteurs, l'hypothèse d'une information complète du canal à l'émission n'est pas possible à cause de la quantité d'information de retour nécessitant beaucoup d'énergie.

2.1 Le précodeur $\max-d_{\min}$

La solution du $\max-d_{\min}$ est basée sur une décomposition en valeurs singulières en utilisant l'équation suivante :

$$\mathbf{y} = \mathbf{G}_v \mathbf{H} \mathbf{F}_v \mathbf{F}_d \mathbf{x} + \mathbf{G}_v \mathbf{n} \quad (1)$$

où \mathbf{H} est la matrice de canal, \mathbf{F}_v et \mathbf{G}_v sont des matrices unitaires, \mathbf{n} est le bruit blanc gaussien et \mathbf{F}_d optimise le critère d_{\min} . La solution simple à mettre en œuvre est donnée dans [3] pour 2 symboles et une modulation MAQ-4. Les informations de retour à quantifier sont les matrices \mathbf{F}_v et \mathbf{F}_d . Pour quantifier \mathbf{F}_v , nous nous sommes basés sur le travail de D.J. Love [9]. En utilisant l'estimation du canal, le récepteur choisit la matrice $\mathbf{F} = \mathbf{F}_v \mathbf{F}_d$ optimale parmi un dictionnaire de matrices de pré-codage de taille $l = 2^{n_1}$. Seul l'indice est alors renvoyé en utilisant $N_{Fb} = n_1$ bits. Ce dictionnaire est construit a priori empiriquement à partir de simulations du canal MIMO $n_r \times n_t$ de Rayleigh. Ensuite, le critère de choix de l'élément du dictionnaire reste la maximisation de la distance minimale.

2.2 Le précodeur P-OSM

Le précodeur P-OSM est présenté dans [4, 5] et est basé sur un code et 2 rotations. Il transmet $b = 2$ symboles et si $n_t > 2$, une méthode de sélection d'antenne doit être associée. Dans le P-OSM, la quantification est plus simple car les informations de retour à quantifier sont 2 angles (θ_0 et θ_1). Le nombre total de bits envoyés se répartit en $N_{Fb} = (n_{\theta_0} + n_{\theta_1} + n_M + n_{AS})$, où n_{θ_0} et n_{θ_1} sont le nombre de bits pour quantifier les 2 angles

θ_0 et θ_1 respectivement, n_M dépend de la modulation ($n_M = 1$ pour une MAQ-4 [5]) et $n_{AS} = \log_2(C_2^{n_t})$ bits supplémentaires pour la sélection d'antennes si $n_t > 2$.

3 Modèle de consommation d'énergie

3.1 Adaptation au MIMO coopératif

Nous considérons un exemple type d'une communication coopérative entre un groupe (cluster) de n_t nœuds et un collecteur de données ou DGN (Data Gathering Node) possédant plusieurs antennes [2, 6]. Dans ce scénario, chaque nœud possède des données à transmettre au DGN. Chaque nœud commence alors par diffuser ses données sur une courte distance d_m à tous les autres nœuds dans le groupe (transmission locale). Des techniques MIMO (STBC ou précodeurs) sont alors employées pour envoyer simultanément les données au DGN sur une distance d , $d \gg d_m$ (transmission MIMO) où chaque nœud coopérant joue le rôle d'une antenne d'un système multi-antennaire. À la réception, le DGN reçoit le signal MIMO modulé et s'occupe de la recombinaison des signaux. Les capteurs sont soumis à des contraintes strictes de consommation d'énergie alors que le DGN qui possède une alimentation assurera le maximum de calculs. Afin d'optimiser la consommation, le DGN assurera le plus possible de calculs (estimation du canal, SVD, codage, quantification,...). Pour évaluer la consommation d'énergie, nous considérons le modèle d'énergie présenté dans [1] prenant en compte la puissance dissipée dans le circuit P_c et la puissance de transmission P_{pa} . Cette dernière est calculée selon la relation de [1, 10] :

$$P_{pa} = (\xi/\eta) \cdot (E_b/N_0) \cdot ((4\pi)^2 d^k M_l N_r) / (G_t G_r \lambda^2) \cdot R_b \quad (2)$$

où ξ est le rapport crête-moyenne (PAR : Peak-to-Average Ratio), η est l'efficacité de l'amplificateur, E_b/N_0 est l'énergie par bit sur le bruit requise pour assurer un TEB cible, R_b est le débit binaire, G_t et G_r sont les gains d'antennes respectivement à l'émission et à la réception, λ est la longueur d'onde, M_l est la marge de liaison, N_r est la densité de bruit total effectif à l'entrée du récepteur [1, 11], d est la distance de transmission, k est l'exposant d'atténuation. L'énergie totale par bit consommée E_t peut être estimée par :

$$E_t = (P_{pa} + P_c) / R_b = E_{pa} + E_c \quad (3)$$

où E_{pa} est l'énergie de transmission et E_c est l'énergie de circuits. Afin de prendre en compte l'énergie consommée pour envoyer les symboles d'apprentissage nécessaires à l'estimation de canal, R_b peut être remplacé par $R_b^{\text{eff}} = R_b \cdot (F - pn_t) / F$, où F est le nombre symboles par paquet et pn_t est le nombre de symboles d'apprentissage insérés dans chaque paquet (p symboles émis par chaque nœud) [2].

3.2 Les avantages des précodeurs

L'utilisation des précodeurs réduit le rapport E_b/N_0 pour le même TEB cible ce qui peut apporter un gain important car, dans la plupart des situations, l'énergie E_{pa} est le terme dominant dans l'énergie totale consommée E_t . Les précodeurs

augmentent également R_b grâce à leur efficacité spectrale avec $R_b = r \cdot \log_2(M) \cdot B$ où M est le nombre de symboles de la constellation de la modulation, B est la bande passante de la modulation, r est le rendement du système MIMO. Le paramètre r est égal à 2 pour max- d_{\min} et P-OSM, et à 3/4 pour STBC utilisé dans notre étude (le meilleur rendement des STBC est 1 pour $n_t = 2$). Grâce à cette augmentation de l'efficacité spectrale, le temps de transmission est réduit ce qui conduit à diminuer la consommation d'énergie de circuit E_c .

La figure 1 montre le TEB des max- d_{\min} et P-OSM avec une CSI complète et quantifiée sur 7 bits en fonction de E_b/N_0 pour un MIMO 4×4 dans un canal de Rayleigh. Elle présente également le TEB des STBC avec un rendement de 3/4. Une MAQ-4 est utilisée pour les précodeurs ce qui donne une efficacité spectrale de 4 bits/s/Hz alors que les STBC utilisent une MAQ-16 avec une efficacité spectrale de 3 bits/s/Hz. L'information retournée est quantifiée comme suit : max- d_{\min} avec $n_1 = 7$ et P-OSM avec $n_{\theta_0} = 2$, $n_{\theta_1} = 1$, $n_M = 1$, $n_{AS} = 3$. La figure 1 montre que la quantification introduit une perte de E_b/N_0 de 1,4 dB pour le max- d_{\min} et 2 dB pour le P-OSM. Pour un TEB cible de 10^{-4} , les E_b/N_0 sont respectivement 2.5 dB, 5.1 dB et 6.8 dB pour les max- d_{\min} , P-OSM et STBC. Ces résultats indiquent l'intérêt des précodeurs même avec un canal de retour limité. Enfin, le paramètre ξ (PAR)

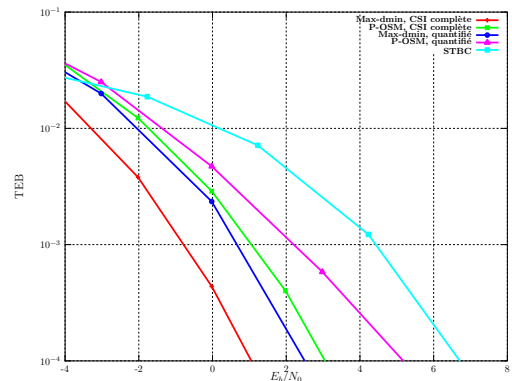


FIGURE 1 – TEB : max- d_{\min} , P-OSM et STBC

dépend de la modulation [12] et est défini pour les STBC avec une MAQ- M comme $\xi = 3(M - 2\sqrt{M} + 1) / (M - 1)$. Ce calcul n'est plus valide pour les précodeurs car chaque signal émis devient un signal composite à cause du traitement effectué. Les valeurs du PAR pour les systèmes MIMO précodés ne sont pas faciles à obtenir analytiquement [13]. Ainsi, nous avons trouvé ces valeurs à l'aide d'une analyse numérique. Pour un système classique avec une MAQ-4, ξ est égal à 1. Lorsque les précodeurs sont appliqués, le P-OSM assure encore cette valeur alors que le max- d_{\min} a un PAR plus pénalisant $\xi = 1.6$.

4 Mise en place des précodeurs

4.1 Le précodeur max- d_{\min}

Sur la figure 2, nous proposons un système de communication pour le précodeur max- d_{\min} . Chaque nœud dans le cluster

a L bits à transmettre au DGN. La transmission locale sur des distances courtes d_m considère un canal gaussien (AWGN) et une modulation MAQ-16 [14]. Les nœuds à l'émission doivent connaître la CSI avant de transmettre les paquets de données au DGN. Pour cela, une phase d'initialisation doit d'abord être effectuée où les nœuds coopèrent en mode STBC et débutent la transmission en envoyant des symboles d'apprentissage (pn_t symboles) nécessaires pour l'estimation du canal (le STBC nécessite seulement la CSI à la réception). Cette opération permet au DGN d'estimer le canal et d'envoyer la CSI quantifiée aux nœuds. Après avoir reçue l'information de retour, les n_t nœuds transmettent leurs paquets en utilisant les précodeurs MIMO au DGN sur une distance $d \gg d_m$ (transmission réelle des données). Pour les paquets suivants, les symboles d'apprentissage sont insérés permettant la poursuite de l'estimation du canal. L'énergie totale consommée par le système MIMO coopératif :

$$E_{C_{\text{CoopPrécodateur}}} = E_{\text{Loc}} + E_{\text{Init}} + E_{\text{Fb}} + E_l \quad (4)$$

où les différentes énergies consommées sont pour :

- la transmission locale $E_{\text{Loc}} = N_p \cdot (P_{pa} + P_c) / R_b^{\text{effLoc}}$, où $P_c = P_c^{Tx} + (n_r - 1)P_c^{Rx}$, $N_p = n_t \cdot L$ est le nombre total de bits dans tous les paquets envoyés et P_{pa} est calculée selon (2) pour une transmission SISO AWGN et MAQ-16.
- la phase d'initialisation, $E_{\text{Init}} = N_{Ts} \cdot (P_{pa} + P_c) / R_b^{\text{STBC}}$, où $P_c = n_t \cdot P_c^{Tx}$, N_{Ts} est le nombre de bits d'apprentissage et P_{pa} est calculée selon (2) pour une transmission MIMO STBC sur un canal MIMO $n_t \times n_r$ de Rayleigh et une MAQ-4.
- le canal de retour $E_{\text{Fb}} = (N_{Fb} \cdot n_t \cdot P_c^{Rx} / R_b) \cdot N_{\text{packet}}$, où les n_t nœuds agissent comme des récepteurs, N_{Fb} est le nombre de bits dans le canal de retour ($N_{Fb} = 7$ bits) et N_{packet} est le nombre de paquets à envoyer (estimation par paquet).
- la transmission MIMO des paquets de données $E_l = N_p \cdot (P_{pa} + P_c) / R_b^{\text{effprécodateur}}$, où $P_c = n_t \cdot P_c^{Tx}$ et P_{pa} est calculée selon (2) pour une transmission avec précodeur sur un canal MIMO $n_t \times n_r$ de Rayleigh.

4.2 Le précodeur P-OSM

Pour $n_t = 2$, la mise en place du P-OSM est la même que pour le max- d_{\min} . Lorsque $n_t > 2$, le précodeur P-OSM doit être associé avec une méthode de sélection d'antennes [5] qui est effectuée au DGN après l'estimation du canal. Cependant, le P-OSM n'utilise que 2 antennes sur n_t mais l'estimation doit être complète. Pour y remédier, nous proposons plusieurs con-

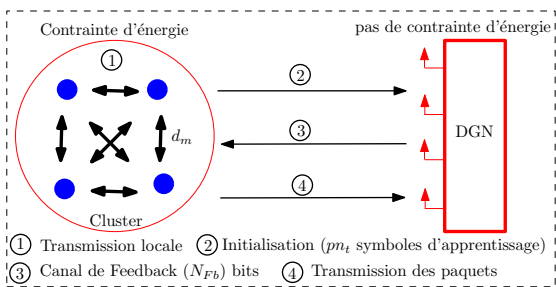


FIGURE 2 – Principe du MIMO coopératif avec précodage

figurations possibles basées sur une alternance entre le P-OSM et les codes STBC :

Configuration 1 : les nœuds transmettent leur premier paquet en utilisant les codes STBC ce qui permet au DGN d'estimer le canal MIMO ($n_t \times n_r$) et de renvoyer son estimation quantifiée. Les nœuds transmettent ensuite leur deuxième paquet en utilisant le précodeur P-OSM sur deux antennes parmi les n_t antennes. Les paquets de données sont ensuite envoyés en alternant les STBC et le P-OSM. La modulation utilisée pour les STBC est une MAQ-4 ce qui donne une efficacité spectrale égale à $(r \cdot \log_2(M)|_{\text{STBC}} + r \cdot \log_2(M)|_{\text{P-OSM}}) / 2 = (3/4 \times 2 + 2 \times 2) / 2 = 2.75$ bits/s/Hz.

Configuration 2 : c'est la même que la configuration 1 mais en utilisant une MAQ-16 pour les codes STBC ce qui donne une efficacité spectrale de 3.5 bits/s/Hz.

Configuration 3 : les STBC sont sollicités pour envoyer seulement les pn_t symboles d'apprentissage pour l'estimation du canal (pas de données envoyées). Une MAQ-4 est utilisée pour les STBC. L'efficacité spectrale pour la transmission de données égale à 4 bits/s/Hz car les paquets de données sont seulement envoyés par le P-OSM. L'énergie totale consommée dans ce cas : $E_{C_{\text{CoopPOS3}}} = E_{\text{Loc}} + N_{\text{packet}} E_{\text{Init}} + E_{\text{Fb}} + E_{l2}$ où E_{Init} et E_{Fb} sont calculées comme dans le cas du précodeur max- d_{\min} , $E_{l2} = N_p (P_{pa} + P_c) / R_b^{\text{précodateur}}$, où $P_c = 2P_c^{Tx}$ (2 antennes) et P_{pa} est calculée selon (2) pour une transmission MIMO P-OSM.

Finalement, l'énergie totale consommée par un MIMO STBC coopératif pour envoyer le même nombre de bits sur la distance d est : $E_{C_{\text{CoopSTBC}}} = E_{\text{Loc}} + N_p \left(\frac{P_{pa} + P_c}{R_b^{\text{STBC}}} \right)$, $P_c = n_t P_c^{Tx}$ où P_{pa} est calculée selon (2) pour une transmission MIMO STBC. L'énergie E_{Loc} est la même dans tous ces systèmes coopératifs. R_b^{eff} est seulement considéré lorsque les symboles d'apprentissage sont insérés dans les paquets de données et notre scénario ne prend pas en compte la consommation d'énergie du DGN car il n'a pas de contraintes. En comparant les performances de ces systèmes coopératifs, le délai de transmission est également important. Celui-ci est défini comme le temps total nécessaire pour transmettre tous les bits de données du cluster au DGN.

5 Résultats de simulation

Pour évaluer la consommation d'énergie, nous considérons les mêmes paramètres de modèle d'énergie présentés dans [1]. L'énergie totale consommée pour transmettre $L = 10^4$ bits avec un TEB cible de 10^{-4} sur un canal de Rayleigh est calculée en fonction de la distance d entre les nœuds et le DGN. Les autres paramètres sont : $n_t = n_r = 4$ antennes (MIMO 4×4), $d_m = 10$ m, $N_{Fb} = 7$ bits, $p = 10$ symboles, $k = 3.5$ et une fréquence porteuse de 2.5 GHz. L'efficacité spectrale ciblée du système est 4 bits/s/Hz. De plus, la synchronisation et l'estimation de canal sont supposées parfaites.

Nous avons d'abord évalué la consommation d'énergie et le délai dans les 3 configurations du P-OSM. La configuration 1 présente la meilleure consommation d'énergie mais avec un

délat important (2.97 s) à cause d'une faible efficacité spectrale. La configuration 2 présente une consommation d'énergie élevée avec un délat plus faible (2.25 s) car elle applique une MAQ-16 pour les codes STBC ce qui réduit le temps de transmission. En revanche, la configuration 3 nous donne le meilleur délat (2.16 s) et une consommation d'énergie légèrement supérieure à celle de la configuration 1. En conclusion, nous considérons que la configuration 3 offre le meilleur compromis consommation/délat et sera notre référence pour le P-OSM.

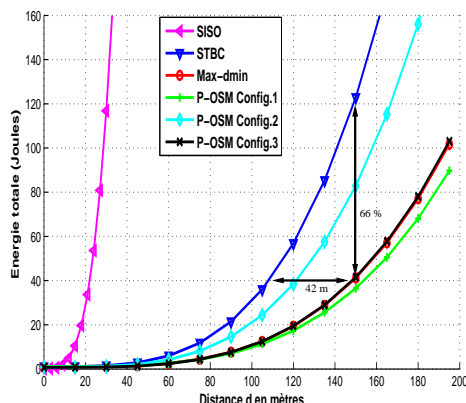


FIGURE 3 – Consommation d'énergie des MIMO coopératifs

La figure 3 présente aussi la consommation totale d'énergie et les délais de transmission sont respectivement 2.11, 2.16, 2.47 et 1 s pour les max- d_{\min} , P-OSM, STBC et SISO. Les résultats du SISO sont également affichés à titre indicatif car il consomme beaucoup plus d'énergie mais présente le délat de transmission le plus petit. En effet, le MIMO coopératif est pénalisé par la coopération supplémentaire. En revanche, les systèmes basés sur les précodeurs max- d_{\min} et P-OSM donnent les meilleures performances en terme de consommation d'énergie et du délat de transmission en comparaison avec le MIMO STBC et malgré la mise en place du lien retour. Cependant, un compromis entre le délat et la consommation apparaît. Cela est dû aux diverses améliorations apportées par les précodeurs (E_b/N_0 et l'efficacité spectrale). De plus, la quantification ($N_{Fb} = 7$ bits retournés) permet de réduire efficacement l'énergie et le délat dans le canal de retour tout en conservant des performances raisonnables de TEB. Par exemple, pour une distance $d = 150$ m, 66% de l'énergie est économisée.

6 Conclusion et perspectives

Les travaux présentés ont montré l'intérêt de la coopération entre nœuds et l'utilisation de précodage afin d'économiser l'énergie consommée. Les deux précodeurs présentent des performances similaires en terme de consommation d'énergie alors que le max- d_{\min} assure un E_b/N_0 plus faible que celui du P-OSM. En effet, le max- d_{\min} est pénalisé par un PAR plus grand ce qui augmente la consommation d'énergie. De point de vue de la mise en oeuvre, le P-OSM peut sembler moins complexe.

Remerciements Ces travaux ont été soutenus par le projet ANR PREDIT MOCAMIMODYN.

Références

- [1] S. Cui, A. J. Goldsmith et A. Bahai. Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. Aug 2004.
- [2] S. K. Jayaweera. Virtual MIMO-based cooperative communication for energy-constrained wireless sensor networks. *IEEE Trans. on Wireless Communication*. May 2006.
- [3] L. Collin, O. Berder, P. Rostaing et G. Burel. Optimal minimum distance-based precoder for MIMO spatial multiplexing systems. *IEEE Trans. on Signal Processing*. 2004.
- [4] H. Lee, S. Park et I. Lee. Orthogonalized Spatial Multiplexing for Closed-Loop MIMO systems. *IEEE Trans. on Communications*, 2006.
- [5] YT. Kim, H. Lee, S. Park et I. Lee. Optimal Precoding for Orthogonalized Spatial Multiplexing in Closed-Loop MIMO Systems *IEEE Journal on Selected Areas in communication*. 2008.
- [6] M. L. Chebolu, S. K. Jayaweera et R. K. Donapati. Signal-processing-aided distributed compression in virtual MIMO-based wireless sensor networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*. Sept. 2007.
- [7] J. Liang et Q. Liang. Channel Selection in Virtual MIMO Wireless Sensor Networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*. June 2009.
- [8] C. Long, H. Chen et L. Li. Energy-Efficiency Cooperative Communications with Node Selection for Wireless Sensor Networks. *IEEE Pacific-Asia Workshop on Computational Intelligence and Industrial Application*. 2008.
- [9] D. J. Love et J. R. W. Heath. Limited feedback unitary precoding for spatial multiplexing *IEEE Trans. Inf. Th.* Aug. 2005.
- [10] J. G. Proakis. *Digital communications*. New York :McGraw-Hill, Fourth Edition. 2000.
- [11] G. L. Stüber *Principles of mobile communication*. Kluwer Academic Publishers, Second Edition 2002.
- [12] F. Xiong *Digital Modulation Techniques*. Boston : Artech House Publishers, Second Edition. 2006
- [13] H.G. Myung, Kyle Jung-Lin Pan, R. Olesen et D. Grieco Peak Power Characteristics of Single Carrier FDMA MIMO Precoding System. *VTC Fall*. 2007
- [14] R. Min, A. Chandrakasan. A framework for energy-scalable communication in high-density wireless networks. *2002 international symposium on Low power electronics and design*. ACM New York, NY, USA 2008.