

Optimisation énergétique des transmissions MIMO coopératives pour les réseaux de capteurs

Tuan-Duc NGUYEN, Olivier BERDER, Olivier SENTIEYS

IRISA

Ecole Nationale Supérieure de Sciences Appliquées et de Technologie
5, rue Kérampont, 22305 LANNION Cedex, France

Prénom.Nom@irisa.fr

Résumé – Les schémas multi-antennes coopératifs sont présentés et comparés aux transmissions mono-antenne classiques en terme d'efficacité énergétique. En considérant les codes spatio-temporels en blocs de Tarokh et d'Alamouti, qui nécessitent moins d'énergie de transmission que les techniques mono-antennes, il est possible de sélectionner le nombre d'éléments coopératifs à l'émission et à la réception en fonction de la distance. Pour les réseaux dont la densité est hétérogène le concept de MIMO coopératif multi-sauts est également introduit.

Abstract – Over radio fading channels, Space Time Block Codes require less transmission energy than SISO techniques for the same Bit Error Rate and can be employed practically in Wireless Sensor Networks by using the cooperative MIMO scheme. Considering Alamouti and Tarokh space-time block codes, the number of antennas at both the transmission and the reception sides are selected with respect to the transmission distance. A cooperative multi-hop MIMO scheme, particularly interesting for heterogeneous density networks, is also introduced.

1 Introduction

Les systèmes utilisant des antennes multiples tant à l'émission qu'à la réception (MIMO pour Multi Input Multi Output) nécessitent moins d'énergie pour une transmission au même taux d'erreur binaire (TEB) que les systèmes mono-antenne (SISO pour Single Input Single Output) [1]. L'efficacité énergétique des transmissions MIMO est particulièrement utile pour les réseaux de capteurs sans fil où chaque noeud doit fonctionner sans échange ou recharge de batterie pendant très longtemps et où la consommation d'énergie est la contrainte la plus importante. Cependant, l'application directe des techniques MIMO à ce contexte est difficile étant donnée la taille limitée des nœuds qui, a priori, ne peuvent supporter qu'une seule antenne. Heureusement la coopération entre capteurs est possible tant à l'émission qu'à la réception pour former un système MIMO "coopératif".

Ces systèmes MIMO coopératifs peuvent alors jouer un rôle particulièrement important pour les transmissions à moyenne ou longue distance où l'énergie de transmission domine la consommation globale [2]. De nombreuses applications, comme la surveillance de zone ou les systèmes de transport intelligents, ont particulièrement besoin de ce genre de transmission car la densité des nœuds peut être faible. Les schémas coopératifs nécessitent toutefois une énergie supplémentaire pour l'échange local de données entre nœuds et les traitements numériques additionnels, ce qui les rend impropres aux courtes transmissions.

Après avoir introduit le principe des systèmes MIMO coopératifs, la structure des codes spatio-temporels en blocs d'Alamouti[3] et Tarokh[4] sera présentée. Un modèle complet de consommation d'énergie permet d'obtenir des ré-

sultats de simulation sur canaux à évanouissements de Rayleigh, démontrant ainsi la supériorité en terme d'efficacité énergétique du schéma MIMO coopératif sur les systèmes SISO et SISO multi-étapes classiquement employés dans les réseaux de capteurs.

2 Système MIMO coopératif pour les réseaux de capteurs sans fil

Au lieu d'utiliser une transmission d'information SISO directe d'une source S à un destinataire D sur une distance d , ce qui n'est pas très efficace pour de longues distances, un système MIMO coopératif peut être créé pour économiser l'énergie de transmission (Fig. 1).

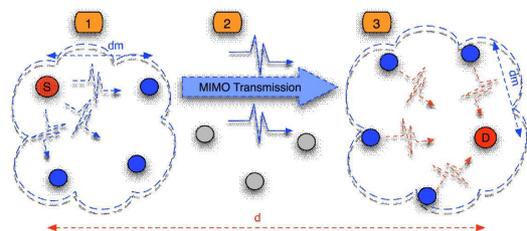


FIG. 1 – Système MIMO coopératif pour les réseaux de capteurs sans fil

Du côté émetteur, le nœud S peut coopérer avec ses voisins et échanger ses données (la distance entre 2 nœuds coopérant $d_m \ll d$). Des techniques MIMO, tels les codes spatio-temporels en blocs (STBC pour Space-Time Block

Codes) ou en treillis (STTC pour Space-Time Trellis Codes), ou encore le multiplexage spatial . . . , sont alors employées pour envoyer simultanément les données au destinataire comme dans un système MIMO classique (chaque nœud coopérant joue le rôle d'une antenne). A la réception, les voisins coopérant reçoivent le signal MIMO modulé et retransmettent leur information respective jusqu'au destinataire en vue de la recombinaison des signaux.

Parmi les techniques multi-antennes, les STBC sont sans doute les plus appropriés au contexte des réseaux de capteurs [5]. En effet les opérations de codage et de recombinaison des signaux sont très simples puisque basées uniquement sur des traitements linéaires. Le schéma d'Alamouti est utilisé pour les systèmes comportant seulement 2 antennes à l'émission, tandis que les STBC développés par Tarokh le sont pour les systèmes à 3 ou 4 émetteurs.

3 Modèle énergétique

3.1 Système non-coopératif

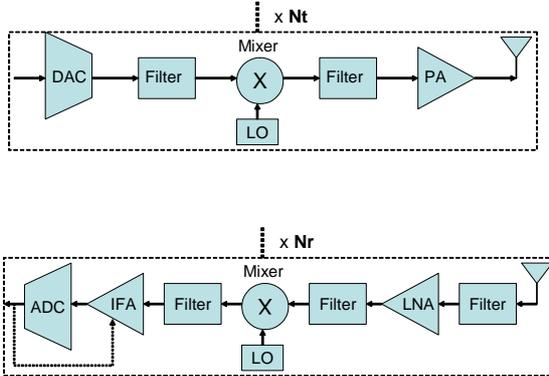


FIG. 2 – Blocs d'émission et de réception

Nous utilisons le modèle d'énergie présenté dans [6] avec les mêmes paramètres pour l'évaluation d'énergie des systèmes MIMO coopératifs. Les chaînes d'émission et de réception RF classiques sont représentées sur la Fig. 2, où N_t et N_r représentent respectivement le nombre d'émetteurs et de récepteurs. Dans un souci de simplicité d'estimation, les blocs de traitement numérique du signal (codage, modulation, détection . . .) sont omis. La consommation totale de puissance d'un système RF non coopératif est constituée de 2 sources principales : la puissance de transmission P_{pa} de l'amplificateur de puissance et la puissance dissipée dans le circuit P_c par tous les blocs RF.

P_{pa} dépend de la puissance d'émission P_{out} . Si l'atténuation du canal suit une loi carrée, P_{out} peut être calculée comme suit

$$P_{out} = \bar{E}_b R_b \times \frac{(4\pi d)^2}{G_t G_r \lambda^2} M_t N_f \quad (1)$$

où \bar{E}_b l'énergie moyenne par bit requise pour un TEB donné, R_b est le débit binaire, d la distance de transmission, G_t et G_r sont les gains d'antennes respectivement à l'émission et à la réception, λ est la longueur d'onde de

la porteuse, M_t est la marge de liaison, N_f le niveau de bruit au récepteur défini par $N_f = N_r/N_0$ avec $N_0 = -171$ dBm/Hz la densité de bruit thermique et N_r est la DSP du bruit total effectif à l'entrée du récepteur [6].

P_{pa} peut être approximée par

$$P_{pa} = (1 + \alpha) P_{out} \quad (2)$$

où $\alpha = \frac{\xi}{\eta} - 1$ avec ξ l'efficacité de l'amplificateur de puissance et η le rapport crête-moyenne (PAR pour Peak-to-Average Ratio) qui dépend de la modulation utilisée et la taille de constellation associée.

La puissance totale dissipée dans le circuit est donnée par

$$P_c \approx N_t (P_{DAC} + P_{mix} + P_{filt} + P_{syn}) + N_r (P_{LNA} + P_{mix} + P_{IFA} + P_{filt} + P_{ADC} + P_{syn}) \quad (3)$$

où P_{DAC} , P_{mix} , P_{LNA} , P_{IFA} , P_{filt} , P_{filt} , P_{ADC} , P_{syn} représentent respectivement la consommation de puissance du CNA, du mélangeur, de l'amplificateur faible bruit, de l'amplificateur de fréquence intermédiaire, des filtres actifs à l'émission et à la réception, du CAN et du synthétiseur de fréquence (toutes ces valeurs sont présentées dans [6]).

Pour un système traditionnel non-coopératif, l'énergie totale par bit consommée E_{bt} peut être obtenue par

$$E_{bt} = (P_{pa} + P_c) / R_b \quad (4)$$

3.2 Système MIMO coopératif

L'énergie supplémentaire demandée par l'échange local de données en vue de la coopération dépend du nombre d'émetteurs qui coopèrent et de la distance d_m entre deux de ces éléments. En fonction de la configuration géographique du réseau, d_m est susceptible de varier de 1 à 10 mètres. Supposons que nous ayons N_b bits à transmettre de S à D (séparés d'une distance d) et qu'il y a N_t et N_r éléments à coopérer en émission et en réception, respectivement.

A l'émission, le nœud S doit d'abord diffuser ses N_b bits d'information aux $N_t - 1$ autres nœuds coopérant. Pour la distance locale courte d_m , nous savons que la transmission mono-antenne est la plus efficace en énergie [2]. Nous supposons qu'il n'y a que des sauts uniques entre 2 nœuds coopérant et qu'une modulation MAQ-16 est utilisée sur un canal à Bruit Blanc Gaussien Additif (BBGA) avec une atténuation en loi K ($K = 3.5$). La MAQ-16 permet de diminuer la consommation de circuit (il faut $E_b/N_0 = 10.5$ dB pour un $TEB = 10^{-5}$ requis sur un canal gaussien). Nous pouvons alors calculer l'énergie par bit consommée pour la transmission locale $E_{pb_{coop}T_x}$ ($d = d_m$ et $N_t - 1$ récepteurs).

La consommation supplémentaire d'énergie à l'émission E_{coopT_x} dépend bien évidemment de la consommation par bit $E_{pb_{coop}T_x}$ et peut être calculée par

$$E_{coopT_x} = N_b E_{pb_{coop}T_x} \quad (5)$$

Après avoir reçu N_b bits du nœud S , les N_t émetteurs coopérant vont coder et moduler leurs bits en symboles STBC QPSK et envoyer l'information simultanément dans le canal à évanouissements de Rayleigh.

A la réception, les $N_r - 1$ récepteurs qui coopèrent vont recevoir cette information MIMO modulée, quantifier un symbole STBC en N_{sb} bits et retransmettre ces derniers jusqu'à D en utilisant une transmission SISO MAQ-16. La consommation supplémentaire d'énergie en réception E_{coopRx} dépend de N_r , N_{sb} et de la consommation d'énergie par bit SISO $E_{pb_{coop}Rx}$ qui peut être facilement calculée pour une distance $d = d_m$. E_{coopRx} est alors obtenue par

$$E_{coopRx} = N_{sb}(N_r - 1)N_b E_{pb_{coop}Rx} \quad (6)$$

Le mode de calcul de l'énergie de transmission et de circuit consommée par le MIMO coopératif est le même que pour du MIMO classique

$$E_{pa} + E_c = N_b E_{bt} \quad (7)$$

Finalement, la consommation d'énergie globale du système MIMO coopératif est

$$E_{total} = E_{pa} + E_c + E_{coopTx} + E_{coopRx} \quad (8)$$

4 Résultats de simulation

Les paramètres des simulations sont les mêmes que ceux présentés dans [6]. Les chiffres donnés représentent l'énergie consommée pour transmettre 10^7 bits avec un TEB de 10^{-5} d'une source S à une destination D séparées d'une distance d . La distance locale entre nœuds coopérants est $d_m = 5m$ et $N_{sb} = 10$.

4.1 MISO vs SISO

Sur la Fig. 3, nous pouvons observer que pour $d < 30$ m, le MISO coopératif est moins efficace en énergie que le SISO traditionnel à cause de la consommation de circuit et la consommation de coopération supplémentaires. En revanche, lorsque $d > 30m$, l'énergie de transmission économisée par le MISO devient plus importante que ce coût supplémentaire et le MISO est alors globalement plus efficace.

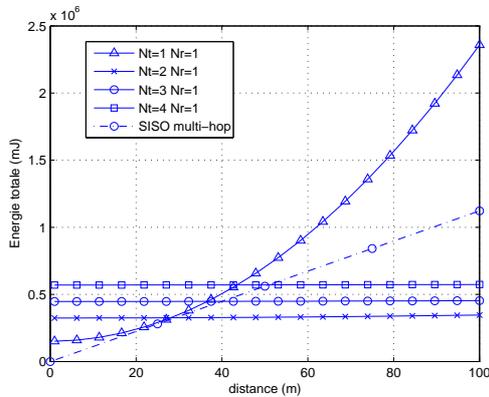


FIG. 3 – Consommation énergétique des systèmes MIMO, SISO et SISO multi-sauts

A une distance $d = 100m$, 85% de l'énergie est sauvée en utilisant la stratégie MISO 2-1 plutôt que le SISO. Plus la

distance est grande, plus l'énergie de transmission domine l'énergie totale consommée et c'est la raison pour laquelle les MISO coopératifs 3-1 et 4-1 deviennent à leur tour les plus rentables à respectivement $d = 300m$ et $d = 700m$.

4.2 MIMO vs MISO

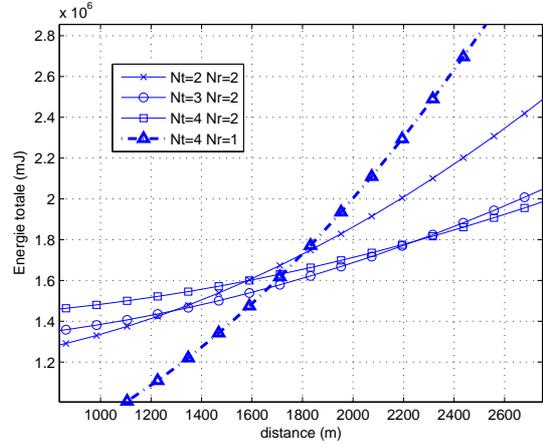


FIG. 4 – Consommation énergétique des systèmes MIMO et MISO

Sur la Fig. 4, le MIMO coopératif 3-2 supplante le 2-2 et le MIMO coopératif 4-2 supplante le 3-2 respectivement aux distances $d = 1300m$ et $d = 2200m$. Pour $d > 1800m$, on peut noter que le meilleur MISO (4-1) est dépassé par le MIMO 2-2. Des résultats équivalents sont d'ailleurs obtenus pour 3 et 4 antennes de réception.

Pour chaque gamme de distance, il est possible de trouver la stratégie la plus efficace possible en énergie en se basant sur le résultat du calcul de consommation. La borne inférieure d'énergie consommée est représentée sur la Fig. 5. Augmenter le nombre de nœuds d'émission est plus efficace que d'augmenter le nombre de récepteurs, principalement à cause de la plus faible énergie de coopération (le nombre de bits pour la coopération à la réception $N_{b_{coop}Rx} = N_{sb}(N_r - 1)N_b$ est plus important que celui à l'émission $N_{b_{coop}Tx} = N_b$).

4.3 MIMO coopératif vs SISO multi-hop et MIMO multi-hop

Pour les longues transmissions dans les réseaux de capteurs sans fil, le SISO multi-hop est la technique traditionnellement utilisée pour réduire l'énergie de transmission. Si on appelle E_h l'énergie consommée par un saut et s'il faut k sauts pour transmettre de S à D , la consommation totale d'énergie est kE_h . Pour la meilleure configuration géographique du réseau (les nœuds intermédiaires sont alignés et régulièrement espacés entre S et D), la consommation totale d'énergie de la technique multi-sauts peut être représentée par la tangente de la courbe SISO. La comparaison entre le SISO multi-sauts et le MIMO coopératif est présentée sur la Fig. 3.

La meilleure gamme de distance pour le SISO simple va

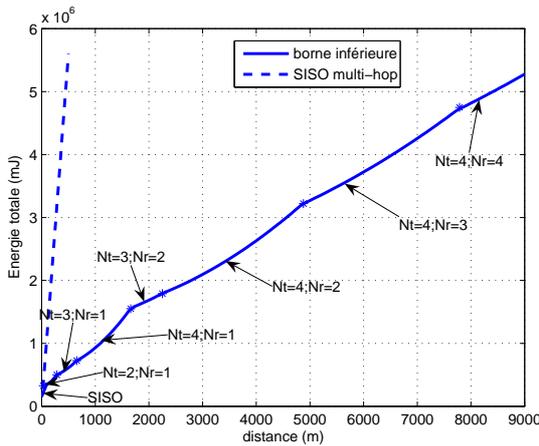


FIG. 5 – Borne inférieure de l'énergie totale consommée

jusqu'à 25m et pour $d = 100\text{m}$, 4 sauts sont nécessaires pour acheminer l'information jusqu'à destination. Il est clair que la technique multi-sauts est plus efficace en énergie que le SISO classique. Pour $d = 100\text{m}$, le multi-sauts peut ainsi économiser jusqu'à 53% de la consommation totale du SISO. Cependant, le SISO multi-sauts est toujours 69% moins efficace que le MISO coopératif 2-1. De plus, si l'on regarde les transmissions plus longues, pour $d = 200\text{m}$, $d = 500\text{m}$ et $d = 1000\text{m}$, le multi-sauts est 83%, 89% 92% moins efficace que les MISO 2-1, 3-1 et 4-1, respectivement. Tout comme le MISO coopératif, le délai des transmissions longues distances dû aux nombreux sauts représente un inconvénient majeur et doit absolument être pris en compte. Il paraît évident que le retard du système MISO (seulement à l'émission) est inférieur à celui généré par les 4 sauts de la technique multi-sauts, ce qui est encore à mettre au crédit des techniques multi-antennes coopératives.

Selon la configuration géographique des réseaux, il est parfois impossible de trouver assez de voisins coopératifs pour former de tels systèmes. Il semble alors intéressant d'allier les techniques MIMO et multi-sauts pour former des systèmes MIMO multi-sauts. La solution la plus prometteuse est alors le 2-2, qui sollicite moins la ressource réseau.

Sur la Fig. 6, on peut voir que la gamme la meilleure pour le MIMO 2-2 coopératif multi-sauts se situe autour de 2500m et pour une distance $d = 7500\text{m}$ (3 sauts), 39% de la consommation d'énergie peut ainsi être économisée par rapport au MIMO coopératif 2-2 simple, alors qu'il est simplement 32% moins efficace que le 4-4. Il est également intéressant de noter que cette technique supplante le 3-2 et le 4-2 pour 3 et 4 sauts, respectivement.

5 Conclusions et perspectives

Les techniques multi-antennes coopératives peuvent procurer un gain en énergie très intéressant dans le domaine des réseaux de capteurs. Les transmissions coopératives MIMO et MISO étant plus efficaces pour les longues distances que les transmissions SISO ou SISO multi-étapes

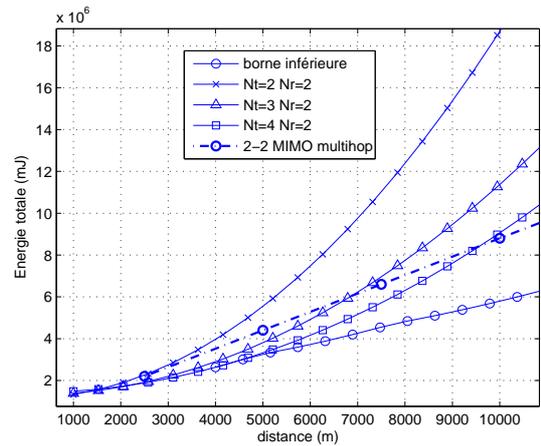


FIG. 6 – Consommation énergétique des systèmes MIMO et MIMO multi-sauts

traditionnelles, il est possible d'optimiser la consommation énergétique en fonction de la distance en choisissant le meilleur ensemble N_t-N_r . Nous avons également introduit le MIMO coopératif multi-sauts 2-2 qui peut s'avérer très intéressant pour des réseaux dont la densité n'est pas homogène.

Cette approche MIMO coopérative nécessitant néanmoins une synchronisation très précise en émission et étant plus sensible aux erreurs d'estimation du canal, des études sont actuellement en cours pour déterminer la dégradation des performances due à ces imprécisions.

Références

- [1] T. L. Marzetta and B. M. Hochwald, "Capacity of a mobile multiple-antenna communication link in Rayleigh flat fading," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 45, pp. 139–157, January 1999.
- [2] S. Cui, A. J. Goldsmith, and A. Bahai, "Energy-efficiency of mimo and cooperative mimo techniques in sensor networks," *IEEE Jour. on Selected Areas in Communications*, vol. 22, no. 6, pp. 1089 – 1098, August 2004.
- [3] S. M. Alamouti, "A simple diversity technique for wireless communications," *IEEE Jour. on Selected Areas in Communications*, vol. 16, no. 8, pp. 1451–1458, 1998.
- [4] V. Tarokh, H. Jafarkhani, and A. R. Calderbank, "Space-time block codes from orthogonal designs," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 45, no. 5, pp. 1456–1467, July 1999.
- [5] L. X. H. Dai and Q. Zhou, "Energy efficiency of mimo transmission strategies in wireless sensor networks," in *International Conference on Computing, Communications and Control Technologies (CCCT)*, Austin, TX, USA, August 2004.
- [6] S. Cui, A. J. Goldsmith, and A. Bahai, "Modulation optimization under energy constraints," in *IEEE International Conference on Communications*, Anchorage, AK, USA, May 2003, pp. 2805 – 2811.