

Sur le partitionnement des bits des voies de retour des systèmes cellulaires coopératifs multi-antennes

Berna ÖZBEK¹, Didier LE RUYET²

Laboratoire Cedric, Conservatoire National des Arts et Métiers
CNAM, 292 rue Saint Martin, 75141 Paris, France
berna.ozbek@cnam.fr, didier.le_ruyet@cnam.fr

Résumé – Dans ce travail, nous considérons les systèmes cellulaires coopératifs en voie descendante dont les stations de base sont équipées de plusieurs antennes. Afin de réduire la quantité d'information échangée entre les stations de base et sur les voies de retour, les utilisateurs et leurs stations de base, il est nécessaire de quantifier efficacement les informations relatives aux différents canaux de transmission. Au lieu d'utiliser un même dictionnaire pour la quantification des canaux de la cellule utile et de la cellule interférente, nous proposons de partitionner les bits des voies de retour en fonction de la position de l'utilisateur dans la cellule. Nous avons montré que ce problème de partitionnement des bits est un problème d'optimisation discrète et nous l'avons résolu sous la contrainte d'un débit moyen sur les voies de retour. Cette approche permet d'augmenter significativement le débit des utilisateurs en bord de cellule.

Abstract – We improve the performance of cell-edge users by applying adaptive bit partitioning for intercell interference cancelation in cooperative downlink multicell systems. The strategy for partitioning quantization bits between serving and interfering base stations affects the performance of the cooperative networks which is quite sensitive to the quality of the channel state information. The existing transmission strategies are based on the maximization of average cell rate which results in a reduced rate for the users in the cell-edge regions. We propose an adaptive bit partitioning strategy to improve the rate of cell-edge users at the same average feedback link rate. We show the performance of the cell-edge users is significantly increased while keeping the same average cell rate.

1 Introduction

Dans les futurs réseaux cellulaires sans fil, la coordination entre les stations de base sera utilisée pour combattre les interférences entre cellules [1]. L'utilisation d'antennes multiples en voie descendante permet d'augmenter le débit global en exploitant les degrés de liberté du domaine spatial. Il est possible d'éliminer jusqu'à $N_t - 1$ signaux d'interférence dans un système multicellulaire avec coordination lorsque la station de base est équipée de N_t antennes.

Afin de réduire la quantité d'informations échangées, des stratégies de coopération partielle où seules les informations canal sont échangées entre les stations de base ont été proposées [2].

La performance des réseaux cellulaires coopératifs dépend de la qualité des informations canal quantifiées puis renvoyées par les utilisateurs en utilisant les voies de retour, relative à la station de base utile et interférente station. La stratégie de partitionnement des bits entre la station de base utile et interférente a un impact sur les performances des réseaux cellulaires coopératifs. Dans [3] les auteurs ont proposé d'adapter la stratégie de transmission en fonction de la position des utilisateurs et la puissance reçue en bord de cellule. Sous la contrainte d'avoir un nombre total de bits renvoyés constant pour chaque utili-

sateur, le choix du partitionnement et le schéma de précodage est déterminé afin de maximiser la somme des débits. Il a été montré que ces choix ne dépendent que de la position de l'utilisateur servi.

Le partitionnement des bits entre la station de base de l'utilisateur et les stations de base interférentes permet d'augmenter le débit global au détriment des utilisateurs situés en bord de cellule. Dans [5], les auteurs ont proposé de restreindre l'alphabet des indices de précodage afin de réduire l'interférence que subissent les utilisateurs en bord de cellule. Pour ce faire les utilisateurs demandent aux stations de base interférence de ne pas utiliser certains vecteurs de précodage engendrant des interférences importantes.

Dans ce papier, nous proposons une stratégie de partitionnement des bits des voies de retour qui permet d'augmenter le débit des utilisateurs situés en bord de cellule tout en maintenant le même débit moyen sur les voies de retour.

Le papier est organisé comme suit : dans la section II, le modèle du système ainsi que les techniques de précodage et de quantification associées sont présentés. Dans la section III, nous proposons une solution originale de partitionnement des bits. La section IV présente les résultats de simulations et les conclusions sont données dans la section V.

Ce travail a été financé par le programme de recherche FP7 Marie Curie Intercell PIEF-GA-2009-255128

2 Modèle du système

Pour simplifier l'analyse, nous considérons un système multi cellulaire basé sur le modèle de Wiener où chaque station de base est composée de N_t antennes.

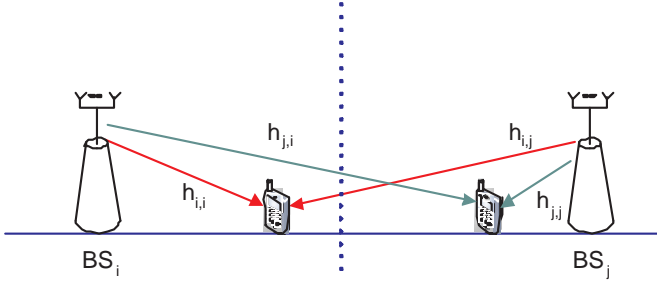


FIGURE 1 – Système multi cellulaire basé sur le modèle de Wiener .

Le signal bande étroite reçu par l'utilisateur de la i -ème cellule peut s'écrire,

$$y_i = \sqrt{P_{i,i}} \mathbf{h}_{i,i}^H \mathbf{w}_i x_i + \sum_{j \neq i} \sqrt{P_{i,j}} \mathbf{h}_{i,j}^H \mathbf{w}_j x_j + n_i \quad (1)$$

où $P_{i,j}$ est la puissance reçue par le i -ème utilisateur et issue de la j -ème station de base, $\mathbf{h}_{i,j}$ est le canal entre le i -ème utilisateur et la j -ème station de base. \mathbf{w}_i est le vecteur de précodage appliqué par la i -ème station de base. Chaque composante de $\mathbf{h}_{i,j}$ est une variable aléatoire i.i.d. $\mathcal{CN}(0, 1)$ et $\mathbf{E}\{\|x_i\|^2\}$ est de norme unitaire.

Le débit moyen de l'utilisateur i est calculé comme suit,

$$R_i = \mathbb{E}[\log_2(1 + \text{SINR}_i)] \quad (2)$$

où le rapport signal sur bruit plus interférence instantané de l'utilisateur dans la cellule i est égal à :

$$\text{SINR}_i = \frac{P_{i,i} |\mathbf{h}_{i,i}^H \mathbf{w}_i|^2}{1 + \sum_{j \neq i} P_{i,j} |\mathbf{h}_{i,j}^H \mathbf{w}_j|^2} \quad (3)$$

La puissance reçue par les utilisateurs est calculée en utilisant le modèle d'atténuation suivant :

$$P_{i,j} = P_0 \left(\frac{d_{i,j}}{R} \right)^{-\alpha} \quad (4)$$

où R est le rayon de la cellule, P_0 est la puissance reçue en bord de cellule, α est l'exposant d'atténuation, $d_{i,j}$ est la distance entre l'utilisateur i et la station de base j .

Dans ce travail, nous considérons que chaque utilisateur renvoie ses vecteurs de direction des canaux (CDI) quantifiés $\hat{\mathbf{h}}_{i,j}$ en utilisant les dictionnaires $\mathcal{C} = \{\mathbf{c}_{i,j}^1, \mathbf{c}_{i,j}^2, \dots, \mathbf{c}_{i,j}^M\}$ où $M = 2^{B_{i,j}}$ est le nombre de mots du dictionnaire.

2.1 Schémas de précodage

En fonction de la position des utilisateurs dans les cellules, deux stratégies de précodage linéaire sont considérées au niveau des stations de base pour la construction du vecteur \mathbf{w}_i :

1) le précodeur Maximum Ratio Combining (MRC) :

Les interférences provenant des autres cellules sont ignorées. Pour la i -ème BS, le vecteur de précodage est donné par

$$\hat{\mathbf{w}}_i = \hat{\mathbf{h}}_{i,i} \quad (5)$$

La distribution de la puissance reçue $|\mathbf{h}_{i,i}^H \hat{\mathbf{w}}_i|^2$ est une loi du χ^2 à $2N_t$ degrés de liberté.

2) le précodeur à forçage à zéro partiel (PZF) :

Afin de maximiser $|\mathbf{h}_{i,i}^H \mathbf{w}_i|^2$, quelques degrés de liberté sont utilisés pour la suppression d'interférence inter cellule. Le vecteur de précodage est donné par

$$\mathbf{w}'_i = (\mathbf{I} - \mathbf{P}) \hat{\mathbf{h}}_{i,i} \quad (6)$$

où $\mathbf{P} = \hat{\mathbf{H}}_i (\hat{\mathbf{H}}_i^* \hat{\mathbf{H}}_i)^{-1} \hat{\mathbf{H}}_i^*$ est la matrice de projection sur $\hat{\mathbf{H}}_i$.

La distribution de la puissance reçue $2|\mathbf{h}_{i,i}^H \mathbf{w}'_i|^2$ est une loi du χ^2 à $2(N_t - (K - 1))$ degrés de liberté.

Les stratégies MRC ou PZF sont sélectionnées en fonction de la position de l'utilisateur.

Si l'utilisateur j requière l'annulation d'interférence inter-cellulaire, on montre que le débit moyen de l'utilisateur i peut être calculé comme suit

$$R_i(d_{i,i}) = \begin{cases} \mathbb{E} \left[\log_2 \left(1 + \frac{P_0 (d_{i,i}/R)^{-\alpha} \gamma_{i,i} Z}{1 + \kappa_{i,j} P_0 (2 - d_{i,i}/R)^{-\alpha} Y} \right) \right] \\ \quad \text{si } (\text{BS}_i, \text{BS}_j) = (\text{PZF}, \text{PZF}) \\ \mathbb{E} \left[\log_2 \left(1 + \frac{P_0 (d_{i,i}/R)^{-\alpha} \gamma'_{i,i} Z}{1 + P_0 (2 - d_{i,i}/R)^{-\alpha} Y} \right) \right] \\ \quad \text{si } (\text{BS}_i, \text{BS}_j) = (\text{PZF}, \text{MRC}) \end{cases}$$

où $2Z \sim \chi_{2(N_t-1)}^2$ et $2Y \sim \chi_2^2$. En supposant que les dictionnaires sont construits aléatoirement (RVQ) les erreurs de quantification sont données par [7] :

$$\gamma_{i,i} = 1 - 2^{B_{i,i}} \beta \left(2^{B_{i,i}}, \frac{N_t}{N_t - 1} \right) \quad (7)$$

$$\gamma'_{i,i} = 1 - 2^{B'_{i,i}} \beta \left(2^{B_{i,i}}, \frac{N_t}{N_t - 1} \right) \quad (8)$$

et

$$\kappa_{i,j} = 2^{B_{i,j}} \beta \left(2^{B_{i,j}}, \frac{N_t}{N_t - 1} \right) \quad (9)$$

où $\beta(x, y)$ est la fonction Beta, $B_{i,i}$ et $B_{i,j}$ sont les nombres de bits utilisés pour quantifier respectivement les canaux $\mathbf{h}_{i,i}$ et $\mathbf{h}_{i,j}$ dans la région de coopération. Dans la région de non coopération, $B_{i,i}$ est remplacé par $B'_{i,i}$ pour quantifier le canal de la station utile. Un résultat similaire peut être obtenu lorsque l'utilisateur j ne requière pas d'annulation d'interférence inter-cellulaire.

3 Stratégie proposée

Le précodage MRC ou PZF sera mis en oeuvre par la station de base j en fonction de la position de l'utilisateur i . Dans ce travail, nous proposons de déterminer le nombre de bits

$B'_{i,i}, B_{i,i}, B_{i,j}$ afin d'augmenter le débit moyen en bord de cellule au détriment du débit dans le centre de la cellule. Pour se faire, nous choisissons deux positions de référence : la première position est à la limite des régions de non coopération (précodage MRC) et de coopération (précodage PZF). La seconde position est le bord de la cellule où l'utilisateur d'intérêt nécessitera une suppression d'interférence intercellulaire.

Les débits de l'utilisateur à ces deux positions limites $R_{k,bs}$ et $R_{k,cell}$ sont les suivants :

$$R_{i,bs} = \mathbb{E} \left[\log_2 \left(1 + \frac{\gamma'_{i,i} P_0 d_{seuil}^{-\alpha} Z}{1 + P_0 (2 - d_{seuil})^{-\alpha} Y} \right) \right] \quad (10)$$

$$R_{i,cell} = \mathbb{E} \left[\log_2 \left(1 + \frac{\gamma_{i,i} P_0 Z}{1 + \kappa_{i,j} P_0 Y} \right) \right] \quad (11)$$

où $d_{seuil} = d_{i,i}/R$ est la distance normalisée entre la station de base et la première position de l'utilisateur.

Le problème d'optimisation discrète consiste à déterminer $B'_{i,i}, B_{i,i}, B_{i,j}$ maximisant la somme des débits de l'utilisateur i aux deux positions de référence :

$$\max_{B'_{i,i}, B_{i,i}, B_{i,j}} R_w = R_{i,bs} + R_{i,cell} \quad (12)$$

sous la contrainte simplifiée :

$$d_{seuil} B'_{i,i} + (1 - d_{seuil})(B_{i,i} + B_{i,j}) = B_{avg} \quad (13)$$

Soit la borne supérieure suivante sur le débit moyen suivante

$$R_w \geq \mathbb{E} \left[\log_2 \left(\frac{\gamma'_{i,i} P_0 d_{th}^{-\alpha} Z}{1 + P_0 (2 - d_{th})^{-\alpha} Y} \right) \right] + \mathbb{E} \left[\log_2 \left(\frac{\gamma_{i,i} P_0 Z}{1 + \kappa_{i,j} P_0 Y} \right) \right]$$

En développant l'expression, nous obtenons :

$$R_w \geq \log_2(\gamma'_{i,i} P_0 d_{th}^{-\alpha}) + \log_2(\mathbb{E}[Z]) - \log_2(1 + P_0 (2 - d_{th})^{-\alpha} \mathbb{E}[Y]) + \log_2(\gamma_{i,i} P_0) + \log_2(\mathbb{E}[Z]) - \log_2(1 + \kappa_{i,j} P_0 \mathbb{E}[Y])$$

Comme $\mathbb{E}[Z] = N_t$ et $\mathbb{E}[Y] = 1$ sont des constantes et que l'erreur de quantification est bornée supérieurement par $\mathbb{E}[\sin^2(\theta_{i,j})] < 2^{-\frac{B_{i,j}}{N_t-1}}$ où θ est l'angle entre la direction exacte et quantifiée, nous pouvons écrire,

$$R_w \geq \log_2((1 - 2^{-\frac{B'_{i,i}}{N_t-1}}) P_0 d_{th}^{-\alpha}) - \log_2(1 + P_0 (2 - d_{th})^{-\alpha}) + \log_2((1 - 2^{-\frac{B_{i,i}}{N_t-1}}) P_0) - \log_2(1 + 2^{-\frac{B_{i,j}}{N_t-1}} P_0) - \log_2(1 + 2^{-\frac{B_{i,j}}{N_t-1}} P_0) = R_{wp} \quad (14)$$

Ainsi, les valeurs de $B'_{i,i}, B_{i,i}, B_{i,j}$ qui maximise cette borne sont obtenues en utilisant des multiplieurs de Lagrange.

$$L(B'_{i,i}, B_{i,i}, B_{i,j}, \lambda) = R_{wp} + \lambda d_{th} B'_{i,i} + \lambda(1 - d_{th})(B_{i,i} + B_{i,j}) - \lambda B_{avg}$$

Nous avons alors :

$$\frac{\partial L}{\partial B'_{i,i}} = \frac{1}{(N_t - 1)} \frac{2^{-B'_{i,i}/(N_t-1)}}{[1 - 2^{-B'_{i,j}/(N_t-1)}]} + \lambda d_{th} = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial B_{i,i}} = \frac{1}{(N_t - 1)} \frac{2^{-B_{i,i}/(N_t-1)}}{[1 - 2^{-B_{i,i}/(N_t-1)}]} + \lambda(1 - d_{th}) = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial B_{i,j}} = \frac{P_0}{(N_t - 1)} \frac{2^{-B_{i,j}/(N_t-1)}}{[1 + P_0 2^{-B_{i,j}/(N_t-1)}]} + \lambda(1 - d_{th}) = 0$$

Après calcul, on obtient les solutions suivantes :

$$B'_{i,i} = (1 - N_t) \log_2 \left(\frac{\lambda A}{\lambda A - 1} \right)$$

$$B_{i,i} = (1 - N_t) \log_2 \left(\frac{-\lambda B}{1 - \lambda B} \right)$$

$$B_{i,j} = (1 - N_t) \log_2 \left(\frac{-\lambda B}{P_0(1 + \lambda B)} \right)$$

où $A = d_{seuil}(N_t - 1)$, $B = (1 - d_{seuil})(N_t - 1)$.

Les valeurs obtenues $B'_{i,i}, B_{i,i}, B_{i,j}$ sont alors arrondies pour obtenir des entiers positifs. λ peut être calculée en fonction de $d_{seuil}, P_0, B_{avg}, N_t$ en résolvant cette équation :

$$\left(\frac{\lambda A}{A - 1} \right)^A \left(\frac{(\lambda B)^2}{P_0(1 - (\lambda B)^2)} \right)^B - 2^{B_{avg}} = 0$$

4 Résultats de simulation

Les résultats de simulations sont présentés pour $N_t = 4$, $R = 1\text{km}$ et $\alpha = 3.7$.

Sur la figure 2, nous comparons le débit moyen par utilisateur en fonction de la position de l'utilisateur dans la cellule.

La stratégie "répartition égale" signifie que dans la région non coopérative B_{avg} bits sont utilisés pour quantifier les informations CDI des stations de base utile et dans la région coopérative, $B_{avg}/2$ bits sont utilisés pour quantifier les informations CDI des stations de base utile et interférente. Nous montrons que la stratégie proposée augmente significativement le débit de l'utilisateur situé en bordure de cellule.

Le débit moyen des utilisateurs i en bord de cellule en fonction du nombre moyen de bits renvoyés est présenté sur la figure 3. La position de l'utilisateur j est distribuée uniformément dans sa cellule. La stratégie de partitionnement de bit augmente significativement le débit des utilisateurs en bords de cellule par rapport à un partitionnement fixe et pour le même débit de voie de retour.

Les performances de la stratégie proposée sont comparées à celles de la stratégie PMI [5] pour $d_{th} = 0.6$ et $B_{avg} = 7$ sur la figure 4. Afin d'obtenir le même débit moyen sur la voie de retour, nous avons fixé le nombre de bits de quantification

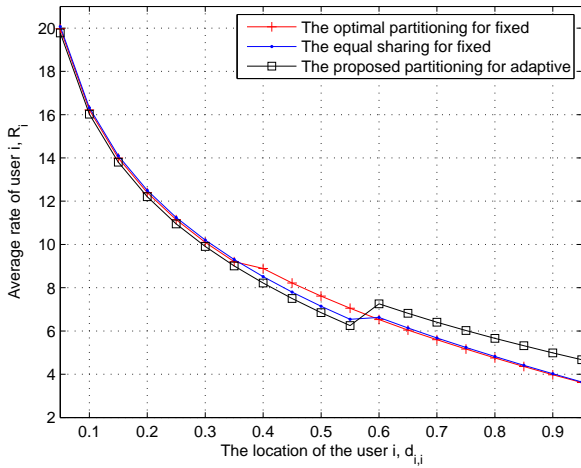


FIGURE 2 – Débit moyen de l'utilisateur i en fonction de sa position dans la cellule pour $d_{th} = 0.6$ et $B_{avg} = 12$.

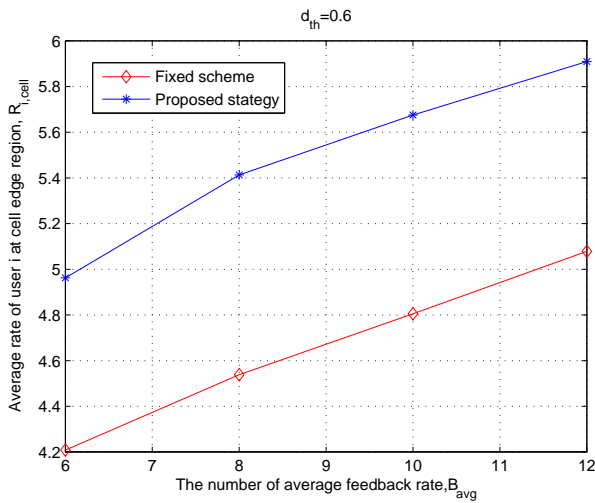


FIGURE 3 – Débit moyen de l'utilisateur i en bord de cellule.

à $B'_{i,i} = B_{i,i} = B_{i,j} = 5$ pour la stratégie PMI et $B'_{i,i} = 3$, $B_{i,i} = 4$, $B_{i,j} = 9$ pour la stratégie proposée. Nous pouvons observer sur la figure 4 que le partitionnement proposé permet d'augmenter significativement le débit des utilisateurs situés en bord de cellule.

5 Conclusion

Dans ce papier nous avons proposé une stratégie de partitionnement des bits permettant d'augmenter le débit des utilisateurs en bord de cellule dans les réseaux cellulaires coopératifs. Les informations CDI des stations de base utile et interférente pour les utilisateurs en bord de cellule sont bien quantifiées afin de réduire l'impact de l'interférence de l'autre cellule. Le partitionnement optimal est obtenu après résolution du problème d'optimisation sous contraintes. La stratégie proposée

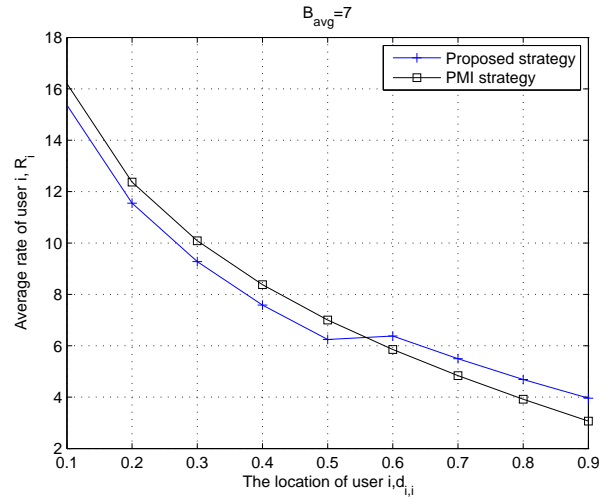


FIGURE 4 – Comparaison du débit moyen pour l'utilisateur i en fonction de la position dans la cellule.

augmente le débit des utilisateurs en bord de cellule de 50% en réduisant d'environ 10% le débit des utilisateurs de la région non coopérative.

Références

- [1] D. Gesbert, S. Hanly, H. Huang, S. Shamai, O. Simeone "Multi-cell MIMO Cooperative Networks : A new Look at Interference", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 28, no. 9, pp. 1–29, Dec. 2010.
- [2] F. Boccardi and H. Huang, "Limited downlink network coordination in cellular networks", *Proc. of the IEEE Int. Symp. on Personal Indoor and Mobile Radio Comm. (PIMRC)*, Athens, Greece, Sept. 2007.
- [3] J. Zhang and J. G. Andrews, "Adaptive Spatial Inter-cell Interference Cancellation in Multicell Wireless Network", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol :28, no :9, pp :1455-1468, Dec. 2010.
- [4] R. Bhagavatula and R.W. Heath, "Adaptive Limited Feedback for Sum-rate maximizing Beamforming in Cooperative Multicell Systems", *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 59, no. 2, pp. 800-811, Feb. 2011.
- [5] D. Kim, S. Kim, J. Lim and B.-C. Ihm, "PMI Restriction for the downlink Closed-loop MIMO", *IEEE Std, IEEE C802.16m-08/430*, 2008.
- [6] A. Narula, M. J. Lopez, M. D. Trott and G. W. Wornell, "Efficient use of side information in multiple antenna data transmission over fading channels", *IEEE Journal on Sel. Areas in Commun. (JSAC)*, pp.1423-1436, Oct. 1998.
- [7] N. Jindal, "MIMO broadcast channels with finite-rate feedback", *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, no.11, pp. 5045–5060, 2006.