

Rétrodiffusion coopérative efficace en énergie pour un système multi-utilisateurs à accès multiple NOMA

Hajar EL HASSANI¹, Anne SAVARD^{2,3}, E. Veronica BELMEGA^{4,1}, Rodrigo C. DE LAMARE^{5,6} *

¹ETIS UMR 8051, CY Cergy Paris Université, ENSEA, CNRS, F-95000, Cergy, France

²IMT Nord Europe, Institut Mines Télécom, Centre for Digital Systems, F-59653 Villeneuve d'Ascq, France

³Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, UPHF, UMR 8520 - IEMN, F-59000 Lille, France

⁴LIGM, UMR 8049, Université Gustave Eiffel, CNRS, ESIEE Paris, Marne-la-Vallée, France

⁵CETUC, PUC-Rio, Rio de Janeiro 22451-900, Brazil

⁶Department of Electronics, University of York, York, YO10 5DD, U.K.

{hajar.el-hassani, belmega}@ensea.fr, anne.savard@imt-nord-europe.fr,
rcdl500@ohm.york.ac.uk

Résumé – Dans cet article, l'efficacité énergétique d'un système multi-utilisateurs à accès multiple non orthogonal (NOMA) en présence d'un dispositif de rétrodiffusion est étudiée. L'optimisation de l'efficacité énergétique est formulée comme le compromis entre le débit somme et la consommation totale de puissance, ce qui s'avère être non convexe. Dans un premier temps, nous dérivons l'expression analytique du coefficient de réflexion optimal. De façon remarquable, cette expression permet de reformuler l'optimisation de la politique d'allocation de puissance en un problème d'optimisation convexe, qui a été résolu récemment. Cette solution globale peut être exploitée ensuite pour réduire la complexité de l'algorithme Dinkelbach pour maximiser le ratio débit somme vs. puissance totale. Nos résultats numériques montrent que la présence de dispositifs de rétrodiffusion améliore considérablement l'efficacité énergétique des systèmes NOMA.

Abstract – In this paper, the energy efficiency of multi-user non orthogonal multiple access (NOMA) systems in the presence of a backscatter device is investigated. The energy efficiency maximization is formulated as a tradeoff between the sum rate and the total power consumption and shown to be non-convex. We derive a closed-form expression of the optimal reflection coefficient. Remarkably, the obtained expression allows the remaining optimization of the power allocation policy to be casted into a convex problem, which has recently been solved in closed form. This overall solution can be exploited further to reduce the computational complexity of Dinkelbach's algorithm for maximizing the ratio sum rate vs. total power. Our simulation results show that the presence of backscatter devices significantly improve the energy efficiency of NOMA systems.

1 Introduction

La croissance exponentielle du volume de trafic et des dispositifs connectés au cours de la dernière décennie a entraîné une consommation d'énergie et des émissions de carbone critiques [1]. Minimiser la consommation d'énergie sera donc l'un des principaux enjeux des réseaux de communication du futur; la feuille de route actuelle pour la prochaine génération (6G) prévoit une amélioration de l'efficacité énergétique de 10 à 100 fois par rapport au réseau de 5ème génération (5G) récemment standardisé [2].

L'accès multiple non orthogonal (NOMA) a été reconnu comme une technologie prometteuse permettant d'augmenter l'efficacité spectrale et énergétique (EE) par rapport à l'accès multiple orthogonal (OMA) [3]. En employant le codage par superposition à l'émetteur et l'annulation successive d'interférences

(SIC) au récepteur, les utilisateurs peuvent être multiplexés sur une même ressource radio. Afin d'améliorer les performances des liaisons sans fil et des systèmes d'accès multiple, des techniques telles que les communications coopératives (via relais), les surfaces réfléchissantes intelligentes et la communication par rétrodiffusion ont été développées. Alors que le relais transfère les signaux de la source à la destination, entraînant une consommation d'énergie supplémentaire, les surfaces réfléchissantes intelligentes ne font que refléter les signaux ambiants sans transmettre leur propre message. Contrairement au relais d'amplification et de transmission (AF) qui amplifie le signal reçu, y compris le bruit, la communication par rétrodiffusion ambiante permet d'améliorer les communications en modulant des messages propres tout en réfléchissant les signaux ambiants provenant des stations de base (BS) ou des points d'accès Wi-Fi vers les récepteurs visés. De plus, les dispositifs de rétrodiffusion n'ayant pas besoin d'oscillateurs locaux pour générer des fré-

*Ce travail a été soutenu par le projet ELIOT ANR-18-CE40-0030 et FA-PESP 2018/12579-7 et par IRCICA, CNRS USR 3380, Lille, France.

quences porteuses, ils consomment beaucoup moins d'énergie que les dispositifs conventionnels [4]. Nous étudions donc les performances d'un système NOMA en présence d'une rétrodiffusion, qui peut à la fois envoyer des informations et réfléchir les signaux RF ambiants sans être gourmande en énergie. Plusieurs travaux récents ont combiné NOMA et la rétrodiffusion, montrant l'avantage de cette solution en terme de probabilité de coupure, de débit somme et de débit minimum des utilisateurs [5, 6].

Dans cet article, nous étudions l'efficacité énergétique d'un système NOMA multi-utilisateurs en liaison descendante en présence d'un dispositif de rétrodiffusion. De façon remarquable, nous dérivons une solution analytique présentant un compromis optimal entre le débit somme et la consommation d'énergie sous un budget fini de puissance et des contraintes de qualité de service, et tout ceci pour un nombre arbitraire d'utilisateurs. Nous montrons d'abord que l'expression du coefficient de réflexion optimal peut être obtenue de façon analytique, permettant par la suite d'obtenir un problème d'allocation de puissance convexe et qui a récemment été résolu de façon analytique dans [3] sans le dispositif de rétrodiffusion. De plus, la solution analytique globale que nous avons obtenue peut être ensuite exploitée pour maximiser le ratio entre le débit somme et la consommation de puissance en réduisant la procédure itérative de Dinkelbach à une simple recherche linéaire, contrairement à l'algorithme itératif de sous-gradient proposé dans [6] pour résoudre le même problème pour le cas simple de deux utilisateurs.

2 Système et formulation du problème

Nous considérons une liaison descendante d'une station de base (BS) vers $K \geq 2$ récepteurs (ou utilisateurs) en présence d'un unique dispositif de rétrodiffusion.

À chaque instant t , la BS utilise le codage par superposition et transmet $x(t) = \sum_{i=1}^K \sqrt{p_i} x_i(t)$, où $x_i(t)$ et p_i désignent le message et la puissance allouée par la BS à l'utilisateur $i \in \{1, \dots, K\}$ respectivement. Le dispositif de rétrodiffusion module ensuite son signal $b(t)$ et rétrodiffuse aux K utilisateurs son signal incident en ajustant son coefficient de réflexion $\rho \in [0, 1]$. Comme dans [7], nous supposons que les délais de traitement et de propagation, ainsi que le bruit supplémentaire au niveau du dispositif de rétrodiffusion sont négligeables. Le signal reçu à chaque utilisateur k est donné par

$$y_k(t) = h_k x(t) + \sqrt{\rho} g g_k x(t) b(t) + z_k(t), \quad (1)$$

où h_k , g et g_k désignent respectivement le gain de canal entre la BS et l'utilisateur k , le gain de canal entre la BS et le dispositif de rétrodiffusion, et le gain de canal entre le dispositif de rétrodiffusion et l'utilisateur k . Puisque pour les systèmes de communication par rétrodiffusion les différentes liaisons sont généralement supposées avoir une forte ligne de vue (LOS) [8], nous considérons un modèle de canal avec seulement un affaiblissement du type $d^{-\eta}$, où d est la distance entre les nœuds d'émission et de réception et η est l'exposant du pathloss. $z_k(t)$, de variance σ_k^2 , est le bruit blanc gaussien additif au récepteur k . Comme le dispositif de rétrodiffusion a généralement un

débit de données beaucoup plus faible que la BS, nous considérons que le message $b(t) = 1$ est constant pendant une période suffisamment longue [9]. Ainsi, le signal reçu s'écrit comme

$$y_k(t) = h_k x(t) + \sqrt{\rho} g g_k x(t) + z_k(t). \quad (2)$$

Par la suite, nous supposons que la BS dispose d'une information parfaite des canaux : h_k et g^d peuvent être obtenus directement via des pilotes, et g_k^d peut être rétrodiffusé vers la BS [5, 6]. De plus, nous supposons sans perte de généralité que les canaux sont ordonnés : $h_1^2/\sigma_1^2 \geq h_2^2/\sigma_2^2 \geq \dots \geq h_K^2/\sigma_K^2$.

Chaque utilisateur applique ensuite le SIC pour récupérer son propre message. Nous supposons l'ordre du SIC fixe et basé uniquement sur l'ordre des canaux entre la BS et les utilisateurs. L'utilisateur k commence par décoder l'interférence de tous les utilisateurs j avec $K \geq j \geq k+1$, et subit l'interférence des utilisateurs $1 \leq j \leq k-1$. Ainsi, le débit atteignable de l'utilisateur k est [10]

$$R_k(\rho, \mathbf{p}) = C(\min_i(\gamma_{k \rightarrow i})), \quad \forall i, k \in \{1, \dots, K\}, \quad (3)$$

où $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_K)$ est le vecteur d'allocation de puissance, $C(x) = 1/2 \log_2(1+x)$ désigne la capacité du canal point-à-point avec bruit additif Gaussien, et $\gamma_{k \rightarrow i}$ est le rapport signal sur interférence plus bruit (SINR) lors du décodage du message destiné à l'utilisateur k au récepteur i donné par

$$\gamma_{k \rightarrow i} = \frac{(h_i + \sqrt{\rho} g g_i)^2 p_k}{(h_i + \sqrt{\rho} g g_i)^2 (p_1 + \dots + p_{k-1}) + \sigma_i^2} \quad (4)$$

De plus, la BS dispose d'un budget de puissance total tel que $\sum_k p_k \leq P_{\max}$ et chaque utilisateur a une contrainte de débit minimum (QoS) donnée par $R_k(\rho, \mathbf{p}) \geq R_{\min, k}$.

Les notations suivantes seront utilisées dans la suite de l'article : $A_k = 2^{2R_{\min, k}}$, $\theta_k = \sum_{i=1}^k p_i$, avec $\theta_0 = 0$, $H_k = h_k/\sigma_k$, $G_k = g g_k/\sigma_k$, $\Gamma_k(\rho) = (H_k + \sqrt{\rho} G_k)^2$.

Afin de garantir l'ordre du SIC, les SINR doivent respecter les contraintes suivantes : $\gamma_{k \rightarrow i} \geq \gamma_{k \rightarrow k}$, $\forall k > 1, \forall i < k$. Dans ce cas, le débit de l'utilisateur k se simplifie en

$$R_k(\rho, \mathbf{p}) = C(\gamma_{k \rightarrow k}) = \frac{1}{2} \log_2 \left(\frac{1 + \Gamma_k(\rho) \theta_k}{1 + \Gamma_k(\rho) \theta_{k-1}} \right). \quad (5)$$

Compromis débit somme vs. consommation de puissance. Comme dans [3, 6], l'efficacité énergétique est mesurée via le compromis scalarisé entre le débit somme et la consommation énergétique : $\sum_k R_k(\rho, \mathbf{p}) - \alpha(\sum_k p_k + P_c)$, où le paramètre $\alpha \geq 0$ décrit le compromis débit - consommation énergétique. P_c représente la consommation énergétique des circuits. Ainsi, nous cherchons à résoudre le problème d'optimisation suivant

$$(\text{EE1}) \quad \max_{\rho, \mathbf{p}} \sum_{k=1}^K \frac{1}{2} \log_2 \left(\frac{1 + \Gamma_k(\rho) \theta_k}{1 + \Gamma_k(\rho) \theta_{k-1}} \right) - \alpha(\theta_K + P_c)$$

$$\text{s.t. } \theta_K \leq P_{\max}, \quad (C1)$$

$$\theta_k \geq A_k \theta_{k-1} + \frac{(A_k - 1)}{\Gamma_k(\rho)}, \quad \forall k, \quad (C2)$$

$$\gamma_{k \rightarrow i} \geq \gamma_{k \rightarrow k}, \quad \forall k \geq 2, \forall i \leq k-1, \quad (C3)$$

$$0 \leq \rho \leq 1, \quad (C4)$$

où (C1) est la contrainte de puissance totale, (C2) sont les K contraintes individuelles de QoS, (C3) sont les contraintes venant du SIC et (C4) est la contrainte sur le coefficient de réflexion.

3 Solution analytique

En raison du couplage entre ρ et \mathbf{p} , le problème d'optimisation (EE1) est non convexe, comme discuté dans [6] pour le cas particulier de $K = 2$ utilisateurs. Ainsi, un algorithme itératif basé sur la dualité et la descente par sous-gradient a été proposé dans [6]. Ici, nous montrons que ce problème peut être résolu de façon analytique dans le cas général multi-utilisateurs $K \geq 2$ sans avoir recours à une procédure itérative.

3.1 Coefficient de réflexion optimal

Comme dans [6], nous commençons par optimiser le coefficient de réflexion ρ pour un vecteur d'allocation de puissance arbitraire \mathbf{p} fixe dans le cas multi-utilisateurs.

Théorème 1. *Le coefficient de réflexion optimal ρ^* pour un vecteur d'allocation de puissance fixe \mathbf{p} est donné par*

$$\rho^* = \begin{cases} \min(1, \min \mathcal{R}), & \text{si } \mathcal{R} \neq \emptyset \\ 1, & \text{si } \mathcal{R} = \emptyset, \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{où } \mathcal{R} \triangleq \left\{ \left(\frac{H_k - H_{k-1}}{G_k - G_{k-1}} \right)^2 \middle| k \in \{2, \dots, K\}, G_k > G_{k-1} \right\}.$$

La preuve est donnée dans [11].

3.2 Allocation optimale de puissance

Compte tenu de ρ^* et en exploitant l'ordre du canal résultant : $\Gamma_1(\rho^*) \geq \Gamma_2(\rho^*) \geq \dots \geq \Gamma_K(\rho^*)$, nous pouvons prouver que le problème d'optimisation (EE1) est équivalent au problème convexe simplifié ci-dessous

$$(EE2) \quad \max_{\mathbf{p}} \sum_{k=1}^K \frac{1}{2} \log_2 \left(\frac{1 + \Gamma_k(\rho^*) \theta_k}{1 + \Gamma_k(\rho^*) \theta_{k-1}} \right) - \alpha (\theta_K + P_c)$$

$$\text{s.t. } \theta_K \leq P_{\max}, \quad (C1')$$

$$\theta_k \geq A_k \theta_{k-1} + \frac{(A_k - 1)}{\Gamma_k(\rho^*)}, \quad \forall k \quad (C2')$$

Le problème (EE2) peut être résolu de façon analytique comme montré dans notre travail précédent [3]. Dans un souci de complétude, nous énonçons les conditions de faisabilité nécessaires et suffisantes ainsi que l'expression analytique de la politique d'allocation de puissance optimale \mathbf{p}^* . Pour les preuves détaillées, nous renvoyons le lecteur intéressé à [3].

Proposition 1. [3, Proposition 1] *Le problème (EE2) est faisable si et seulement si $P_{\max} \geq P_{\min} \triangleq \sum_{i=1}^K \frac{A_i - 1}{\Gamma_i(\rho^*)} \prod_{j=i+1}^K A_j$.*

Théorème 2. [3, Theorem 1] *Lorsque (EE2) est faisable, l'allocation optimale de puissance est obtenue de façon analytique par :*

$$p_k^*(\alpha) = (A_k - 1) \left(\frac{1}{\Gamma_k(\rho^*)} + p_1^*(\alpha) \prod_{i=2}^{k-1} A_i + \sum_{i=2}^{k-1} \frac{A_i - 1}{\Gamma_i(\rho^*)} \prod_{j=i+1}^{k-1} A_j \right), \quad \forall k \geq 2, \quad (7)$$

$$p_1^*(\alpha) = \min \left(\max \left(\bar{p}_1(\alpha); \frac{A_1 - 1}{\Gamma_1(\rho^*)} \right); U_1 \right), \text{ avec}$$

$$U_1 = \left(P_{\max} - P_{\min} + \frac{A_1 - 1}{\Gamma_1(\rho^*)} \prod_{j=2}^K A_j \right) / \prod_{i=2}^K A_i,$$

$$\bar{p}_1(\alpha) = 1 / \left(2 \ln 2 \alpha \prod_{i=2}^K A_i \right) - \frac{1}{\Gamma_1(\rho^*)}.$$

3.3 Ratio débit somme vs. consommation de puissance

Notre solution analytique peut être utilisée pour maximiser une autre mesure d'efficacité énergétique très populaire appelée efficacité énergétique globale, définie comme le ratio entre le débit somme atteignable et la consommation de puissance totale [1]

$$GEE(\rho, \mathbf{p}) = \frac{\sum_{k=1}^K R_k(\rho, \mathbf{p})}{\sum_{k=1}^K p_k + P_c}. \quad (8)$$

Comme ρ n'intervient que dans le numérateur, choisir $\rho = \rho^*$ maximisant la fonction objectif de (EE2) maximise également $GEE(\rho, \mathbf{p})$ pour tous les \mathbf{p} . Ainsi, le découplage des variables n'entraîne aucune perte d'optimalité. Puisque le débit somme $\sum_k R_k(\rho^*, \mathbf{p})$ est une fonction concave par rapport à \mathbf{p} , maximiser $GEE(\rho^*, \mathbf{p})$ par rapport à \mathbf{p} est un programme fractionnaire qui se réduit à chercher le point fixe de la fonction $F(\alpha) = \sum_{k=1}^K R_k(\rho^*, \mathbf{p}^*) - \alpha \left(\sum_{k=1}^K p_k^* + P_c \right)$, où \mathbf{p}^* est la solution analytique de (EE2) explicitée dans le Théorème 2. Cette recherche est généralement effectuée via une procédure de Dinkelbach qui est réduite à une simple recherche linéaire grâce à notre solution analytique de (EE2) (cf. Algorithme 1).

Algorithme 1 Maximization de GEE via Dinkelbach

Initialiser $\epsilon > 0, \alpha = 0$

Calculer ρ^* par eq. (6)

Répéter

Calculer \mathbf{p}^* par eq. (7)

Mettre à jour $F(\alpha) = \sum_{k=1}^K R_k(\rho^*, \mathbf{p}^*) - \alpha \left(\sum_{k=1}^K p_k^* + P_c \right)$

Mettre à jour $\alpha \leftarrow GEE(\rho^*, \mathbf{p}^*)$

Jusqu'à $F(\alpha) \leq \epsilon$

4 Résultats numériques

Dans cette section, nous évaluons l'efficacité énergétique définie par le ratio débit somme vs. consommation de puissance (GEE) de NOMA et OMA avec et sans rétrodiffusion.

Nous fixons la distance maximale entre la BS et le dispositif de rétrodiffusion à 4 m, et entre la BS et les autres récepteurs à 20 m, $P_{\max} = 80$ dBm, $P_c = 30$ dBm, $\sigma_k^2 = \sigma^2 = -20$ dBm et $R_{\min,k} = R_{\min}, \forall k$ [12]. Tous les résultats sont moyennés sur 10^5 réalisations de canaux indépendants et satisfaisant la condition de faisabilité du problème (EE2). Pour OMA, les K utilisateurs sont servis les uns après les autres avec la même durée et pour une comparaison équitable, les mêmes contraintes de QoS minimale s'appliquent.

La Figure 1 représente l'efficacité énergétique en NOMA et OMA avec et sans rétrodiffusion en fonction du nombre d'utilisateurs K pour $R_{\min} = 1$ bit/s. Tout d'abord, NOMA avec rétrodiffusion est toujours plus performant que OMA (avec ou sans rétrodiffusion) et que NOMA classique, quel que soit le nombre d'utilisateurs K . De plus, nous constatons que NOMA avec rétrodiffusion dépasse toujours les autres schémas en terme d'efficacité énergétique.

Par ailleurs, on peut constater que la rétrodiffusion améliore toujours l'efficacité énergétique en NOMA et OMA ; et permet d'obtenir une efficacité énergétique significative pour un grand nombre d'utilisateurs, contrairement à NOMA et OMA sans rétrodiffusion. Enfin, nous constatons que lorsque le nombre d'utilisateurs augmente, l'efficacité énergétique de NOMA avec rétrodiffusion diminue. L'intuition derrière cela découle de l'expression du coefficient de réflexion optimal dans (6), qui dépend de la plus petite différence entre les gains de canal : plus le nombre d'utilisateurs K est grand, plus l'écart de canal est petit. Lorsque K augmente, ρ^* finit par atteindre zéro, annulant l'effet de rétrodiffusion et conduisant à un NOMA classique.

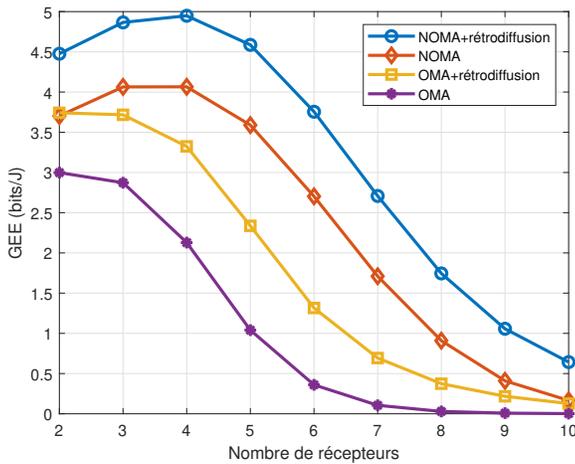


FIGURE 1 – Efficacité énergétique (GEE) en fonction du nombre d'utilisateurs K .

5 Conclusions

Nous avons étudié l'efficacité énergétique d'une liaison descendante multi-utilisateurs NOMA assistée d'un dispositif de rétrodiffusion ambiant. En formulant le problème d'optimisation non convexe comme le compromis entre le débit somme et la consommation de puissance totale, nous avons fourni la

solution analytique pour le coefficient de réflexion et l'allocation de puissance pour un nombre arbitraire d'utilisateurs. De plus, notre solution analytique conduit à un algorithme de Dinkelbach simplifié et peu complexe afin de maximiser le ratio entre le débit somme et la consommation de puissance. Nos simulations montrent que le schéma proposé de NOMA assisté par rétrodiffusion est toujours plus performant qu'OMA avec et sans rétrodiffusion indépendamment du nombre d'utilisateurs.

Références

- [1] A. Zappone and E. Jorswieck, "Energy efficiency in wireless networks via fractional programming theory," *Foundations and Trends in Commun. and Inf. Theory*, vol. 11, no. 3-4, pp. 185–396, 2015.
- [2] M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan, and M. Zorzi, "Toward 6g networks : Use cases and technologies," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 3, pp. 55–61, 2020.
- [3] H. El Hassani, A. Savard, and E. V. Belmaga, "A closed-form solution for energy-efficiency optimization in multi-user downlink NOMA," in *IEEE PIMRC*, 2020, pp. 1–5.
- [4] S. Gong, X. Huang, J. Xu, W. Liu, P. Wang, and D. Niyato, "Backscatter relay communications powered by wireless energy beamforming," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 66, no. 7, pp. 3187–3200, 2018.
- [5] W. Chen, H. Ding, S. Wang, D. B. da Costa, F. Gong, and P. H. J. Nardelli, "Backscatter cooperation in NOMA communications systems," *arXiv preprint arXiv :2006.13646*, 2020.
- [6] Y. Xu, Z. Qin, G. Gui, H. Gacanin, H. Sari, and F. Adachi, "Energy efficiency maximization in NOMA enabled backscatter communications with QoS guarantee," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, 2020.
- [7] G. Yang and Y.-C. Liang, "Backscatter communications over ambient OFDM signals : Transceiver design and performance analysis," in *IEEE GLOBECOM*, 2016, pp. 1–6.
- [8] A. W. Nazar, S. A. Hassan, and H. Jung, "BER analysis of a NOMA Enhanced Backscatter Communication System," in *IEEE GLOBECOM*, 2020, pp. 1–6.
- [9] S. Zhou, W. Xu, K. Wang, C. Pan, M.-S. Alouini, and A. Nallanathan, "Ergodic rate analysis of cooperative ambient backscatter communication," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 8, no. 6, pp. 1679–1682, 2019.
- [10] Z. Ding, Z. Yang, P. Fan, and H. V. Poor, "On the performance of non-orthogonal multiple access in 5G systems with randomly deployed users," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 21, no. 12, pp. 1501–1505, 2014.
- [11] H. El Hassani, A. Savard, E. V. Belmaga, and R. C. de Lamare, "Energy-efficient cooperative backscattering closed-form solution for NOMA," in *IEEE GLOBECOM*, 2021.
- [12] W. Chen, H. Ding, S. Wang, D. B. da Costa, F. Gong, and P. H. J. Nardelli, "Backscatter cooperation in NOMA communications systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 20, no. 6, pp. 3458–3474, 2021.