

**COMPETIȚIA DE PROIECTE DE CERCETARE A ACADEMIEI OAMENILOR
DE ȘTIINȚĂ DIN ROMÂNIA DESTINATĂ TINERILOR CERCETĂTORI
“AOSR-TEAMS” EDIȚIA 2022-2023**

**“Creare de coduri de împrăștiere complexe cu corelație mică”
(CCCOM)**

Raport științific și tehnic

(RST)

Termen	Iunie 2023
Autori	Mădălina-Georgiana Berceanu, Carmen Florea, Răzvan Crăciunescu, Alexandru Badea.
Natură	Raport intermediar

1 INTRODUCERE	3
1.1 Obiectivele proiectului	3
1.2 Obiectivele raportului curent	3
1.3 Rezumat	4
2 ANALIZA PERFORMANTELOR OBȚINUTE DE SISTEMUL DE COMUNICAȚII PROPUS ÎN DIVERSE SCENARII ȘI CONFIGURAȚII	4
2.1 Îmbunătățirea metodei de generare a codurilor de împrăștiere complexe	5
2.2 Relee regenerative și non-regenerative	7
2.2.1. Relee non-regenerative	7
2.2.2. Relee regenerative	8
3 PERSPECTIVE ULTERIOARE DE DEZVOLTARE	9
4 DISEMINARE	9
Bibliografie	9

1 INTRODUCERE

1.1 Obiectivele proiectului

Obiectivul general al acestui proiect constă în evaluarea performanțelor unui sistem 5G atunci când se utilizează tehnici de acces multiplu de tip NOMA (acces multiplu non-ortogonal) în domeniul cod, în absența cât și în prezența releelor regenerative și non-regenerative. Se are în vedere îmbunătățirea rezultatelor obținute de un sistem 5G, stabilind o nouă metodă de generare a codurilor MUSA (acces multiplu simultan al utilizatorilor), coduri care să aibă corelație mică. Aceste coduri urmând să fie testate în diverse scenarii. Acest obiectiv general este susținut de următoarele *obiective specifice*:

O1. Determinarea unor coduri de împrăștiere complexe noi, diferite de cele întâlnite în literatura de specialitate de corelație mică, utilizate pentru accesul multiplu de tip NOMA – MUSA, plecând de la coduri de împrăștiere reale pseudo-aleatoare (Pseudo-Random – PN), care la rândul lor au corelație mică utilizate pentru accesul multiplu de tip OMA (acces multiplu ortogonal) – CDMA (acces multiplu cu diviziune în cod).

O2. Testarea eficienței acestor coduri prin simularea în Matlab a unui lanț de comunicație, în diferite condiții – diferite tipuri de modulații, numărul de utilizatori care va fi determinat ca un compromis între QoS (calitatea serviciului) și costurile totale ale implementării, în absența releelor, urmând ca introducerea lor în sistemul propus, indiferent de tipul acestora, să vină cu o serie de optimizări în vederea creșterii performanțelor.

O3. Determinarea unor coduri de împrăștiere complexe noi, diferite de cele întâlnite în literatura de specialitate, utilizate pentru accesul multiplu de tip NOMA – MUSA, plecând de această dată de la coduri de împrăștiere reale Walsh-Hadamard (coduri care sunt perfect ortogonale), utilizate tot pentru accesul multiplu de tip OMA – CDMA.

O4. Testarea eficienței acestor coduri și analiza comparativă a celor două variante propuse, în funcție de semnalul transmis (aleator sau imagine în tonuri de gri). De asemenea, se va face și o analiză comparativă cu implementări similare prezentate în cele mai recente publicații pentru a verifica acuratețea, eficiența și relevanța rezultatelor obținute.

1.2 Obiectivele raportului curent

Pentru acest raport intermediar, cu termen 30 iunie 2023, s-a avut în vedere îndeplinirea obiectivelor specifice care corespund WP3 și WP4, conform diagramei Gantt din Fig. 1:

- implementarea releelor într-un sistem ce folosește coduri complexe, cu corelație scăzută, plecând de la codurilor PN reale.
- identificarea principalelor constrângeri care pot apărea și calitatea serviciilor impuse de sistem și de cazurile de utilizare studiate;
- Îmbunătățirea metodei de generare a codurilor MUSA prezentată în raportul 2;

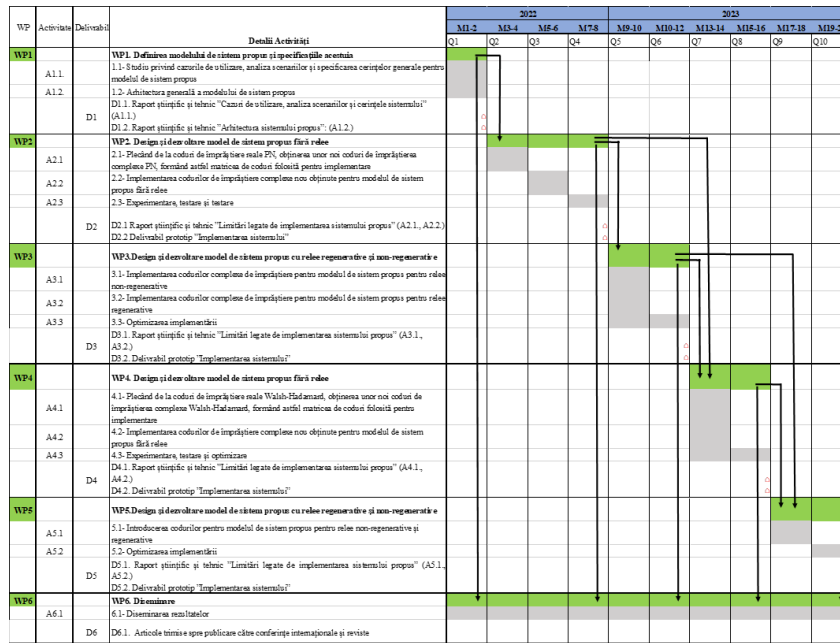


Fig. 1 Diagrama Gantt

1.3 Rezumat

Prezentul raport intermediar este alcătuit dintr-o introducere și alte trei capitole al căror conținut este prezentat pe scurt în cele ce urmează:

Capitolul 2 prezintă o îmbunătățire a metodei de generare a codurilor MUSA, metoda propusă în raportul 2 și face o prezentare a rețelelor folosite și modelului matematic aplicat în simulări.

Capitolul 3 este dedicat viitoarelor direcții de urmat, iar capitolul 4 enumeră articolele publicate până în prezent.

2 ANALIZA PERFORMANTELOR OBTINUTE DE SISTEMUL DE COMUNICAȚII PROPUȘ ÎN DIVERSE SCENARII ȘI CONFIGURAȚII

Tehnicile de acces multiplu reprezintă un pas foarte important în dezvoltarea unei noi generații de sisteme celulare. Schemele de tip OMA au răspuns cu succes provocărilor ridicate de utilizatorii finali până acum câțiva ani, dar acum, când totul evoluează la o scară mai mare, unde este nevoie de conectivitate masivă, o latență scăzută a comunicațiilor [1-6], calitate bună a serviciului (QoS) indiferent de loc și timp, schemele de de tip NOMA sunt răspunsul. NOMA poate obține un randament mai mare și o eficiență spectrală îmbunătățită prin suprapunerea semnalelor în domeniile timp și frecvență și, astfel, mult mai mulți utilizatori pot folosi aceleași resurse în domeniul timp-frecvență și fiind separați într-un alt domeniu [7-9]. NOMA este împărțit în domeniul de putere NOMA [10-13], domeniul cod NOMA [14] care sunt utilizate pentru suprimarea interferenței inter-utilizator (IUI) și domeniul spațial utilizat pentru mMIMO; NOMA a câștigat o mare atenție atât din mediul academic, cât și din industrie [4] [15].

Așa cum s-a menționat și în rapoartele anterioare, atenția noastră s-a îndreptat către NOMA în domeniul cod, având ca punct de plecare un exemplu bine-cunoscut din această categorie și

anume MUSA. Pentru un sistem MUSA, simbolurile fiecărui utilizator sunt împrăștiate folosind coduri complexe generate dintr-un anumit set de valori. Dacă elementul real sau cel imaginar al codului de împrăștiere non-binar aparține setului $\{1, -1\}$, atunci vor fi patru valori pentru selecție $\{1+i, 1-i, -1+i, -1-i\}$. Astfel, pentru un cod de lungime L , numărul total de coduri disponibile este 4^L . Dacă se dorește creșterea numărului de utilizatori, atunci se poate folosi setul $\{0, 1, -1\}$, rezultând nouă valori pentru selecție $\{0, 1, -1, i, -i, 1+i, 1-i, -1+i, -1-i\}$ și 9^L coduri disponibile pentru utilizatori. Un dezavantaj al acestor coduri este că indiferent dacă se folosește setul $\{1, -1\}$ sau $\{0, 1, -1\}$ au nivele diferite de corelație, de la 0 până la 100%, astfel încât dacă aceste coduri sunt alocate în mod aleator se poate ajunge în situația în care QoS se deteriorează pentru anumiți utilizatori.

Ulterior, ne dorim să obținem alte seturi de coduri de împrăștiere complexe de tip MUSA plecând de la coduri de împrăștiere reale care sunt prezente în OMA - PN și Walsh-Hadamard aplicând diverse metode de generare pe care le-am îmbunătățit în urma rezultatelor obținute pe baza simulărilor efectuate.

2.1 Îmbunătățirea metodei de generare a codurilor de împrăștiere complexe

În raportul 2 a fost prezentată o metodă de generare de coduri de tip MUSA pentru sisteme supraîncărcate, plecând de la codurile de împrăștiere reale PN. Această metodă a fost validată într-un sistem în care datele transmise de utilizatori sunt mai întâi modulate (BPSK, QPSK etc.), apoi se aplică tehnica OFDM și la final se folosește accesul multiplu pentru a separa utilizatorii pe canal (afectat de fading Rayleigh).

În cadrul acestui raport se prezintă o îmbunătățire a metodei propuse în raportul 2. Prin această nouă metodă generăm coduri de împrăștiere pentru K utilizatori ($K > L$, unde L reprezintă lungimea codului) astfel

Pasul 1. Se generează codurile PN reale de lungime L (în acest fel se vor obține coduri cu corelația egală cu $1/L$); (identic ca metoda prezentată în raportul 2)

Pasul 2. Se consideră constelația MUSA de tip 4QAM $\{1, -1, i, -i\}$. Se pot înmulți codurile de la **Pasul 1** cu i sau $-i$ pentru a genera coduri de împrăștiere PN complexe (se vor obține astfel L coduri complexe cu corelația egală cu $1/L$, pentru L utilizatori).

Având o constelație cu 4 elemente, în funcție de lungimea codurilor ce se doresc generate rezultă 4^L coduri disponibile pentru utilizatori, iar corelația dintre toate aceste coduri este între 0 (perfect decorelate) și 1 (perfect corelate - ceea ce trebuie evitat).

Pasul 3. În această etapă se generează codurile pentru restul de $K-L$ utilizatori.

3.1 Se generează aleator un număr de N coduri MUSA ($N > K-L$).

3.2 Pentru aceste N coduri se stabilește o metodă de clasificare, de exemplu, se calculează distanța Euclidiană dintre ele și pe baza acesteia se împart codurile într-un număr de clustere. Pentru acest raport se prezintă o metodă pentru 2D (2 dimensional), pentru a putea fi mai simplu de reprezentat grafic. Au fost generate N coduri de lungime 4, iar apoi elementele fiecărui cod au fost adunate și valoarea obținută pentru fiecare cod a fost separată în parte reală și parte imaginară (pentru a obține o matrice cu N linii și 2 coloane). S-a decis împărțirea în 5 clustere pentru figura de mai jos. Considerând un punct de start din spațiul 2D, ales aleator, s-a calculat

distanța euclidiană între acest punct și punctul dat de fiecare linie din matrice. Se observă în Figura 2 că fiecare cod este asociat unui cluster.

3.3 Cei K - L utilizatori care necesită alocare de cod, vor primi coduri din fiecare cluster generat. Se iau coduri pe rând, din fiecare cluster, pentru a evita folosirea de coduri doar dintr-un singur cluster.

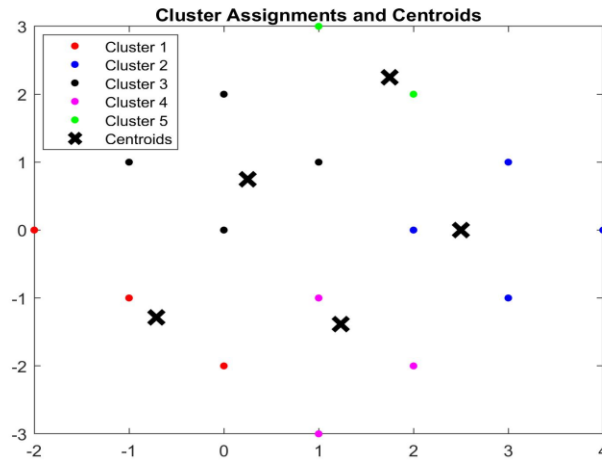


Figura 2 Împărțirea codurilor pe clustere

Metoda de la pasul 3.2 nu e unică, se pot găsi și alte metode de împărțire a codurilor pe clustere. În figura de mai jos se observă avantajul adus de metoda prezentată, față de cazul în care s-ar genera aleatoriu toate codurile. În sistemul prezentat în raportul 2, au fost generate coduri de lungime 4, pentru 20 de utilizatori, folosind metoda clasică și metoda noastră. Stația de bază are 2 antene și au fost folosite 2 detectoare MMSE și MMSE-SIC. Din Figura 3 se observă că indiferent de detectorul folosit metoda noastră aduce îmbunătățiri.

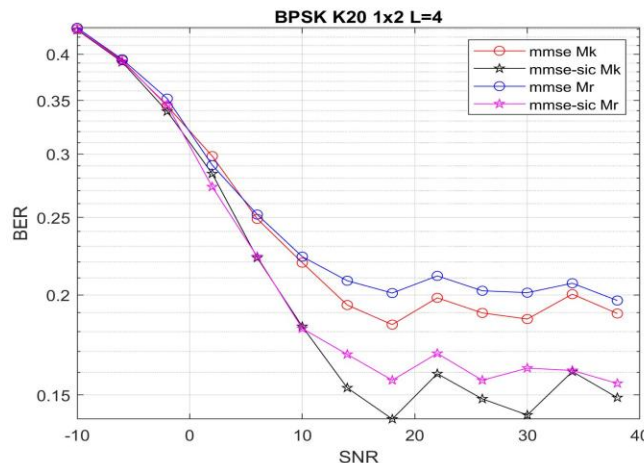


Figura 3 Comparație între coduri MUSA aleator și coduri generate pe baza distanței euclidiene

Aceste rezultate sunt incluse în articolul de revistă [16].

2.2 Relee regenerative și non-regenerative

Având în vedere modelul de sistem care a stat la baza obținerii rezultatelor prezentate anterior și scopul fiind acela de a îmbunătăți și mai mult performanțele s-a decis implementarea unui relee între sursă și destinație. Prin urmare, semnalul recepționat la relee și destinație poate fi descris astfel

$$\mathbf{y}_{SR,k} = \sqrt{P}\mathbf{G}_k\mathbf{x}_k + \mathbf{n}_{SR,k}, \quad k = 1, \dots, K \quad (1)$$

și

$$\mathbf{y}_{SD,k} = \sum_{k=1}^K \sqrt{P}\mathbf{H}_k\mathbf{x}_k + \mathbf{n}_{SD,k}, \quad (2)$$

unde P reprezintă puterea semnalului transmis, \mathbf{G}_k reprezintă matricea canalului pentru utilizatorul k pentru legătura sursă-relee, \mathbf{H}_k reprezintă matricea canalului pentru utilizatorul k pentru legătura sursă-destinație, \mathbf{x}_k reprezintă datele transmise de utilizatorul k , $\mathbf{n}_{SR,k}$ reprezintă vectorul de zgomot Gaussian pentru utilizatorul k pentru legătura sursă-relee cu medie zero și varianță egală $\mathcal{E}[\mathbf{n}_{SR,k}\mathbf{n}_{SR,k}^H] = \sigma_{SR,k}^2$ și $\mathbf{n}_{SD,k}$ reprezintă vectorul de zgomot Gaussian pentru utilizatorul k pentru legătura sursă-destinație cu medie zero și varianță egală $\mathcal{E}[\mathbf{n}_{SD,k}\mathbf{n}_{SD,k}^H] = \sigma_{SD,k}^2$.

Când semnalul ajunge la relee, în funcție de protocolul implementat, se efectuează diferite operații asupra acestuia.

2.2.1. Relee non-regenerative

Semnalul care a ajuns la relee este amplificat folosind un factor de amplificare și apoi trimis la destinație – protocol ce poartă numele de amplifică-și-trimite (AF). Factorul de amplificare, definit pentru fiecare utilizator $k \in \{1,2, \dots, K\}$ poate fi scris astfel

$$A_k = \sqrt{\frac{P_R}{P|\mathbf{G}_k|^2 + \sigma_{SR,k}^2}} \quad (3)$$

$$P + P_R = 1, \quad (4)$$

unde P_R reprezintă puterea semnalului transmis la relee. Prin urmare, semnalul care ajunge la destinație poate fi exprimat astfel

$$\mathbf{y}_{RD,k} = \sum_{k=1}^K A_k\mathbf{F}_k\mathbf{y}_{SR,k} + \mathbf{n}_{RD,k}, \quad (5)$$

unde \mathbf{F}_k reprezintă matricea canalului pentru utilizatorul k pentru legătura relee-destinație, $\mathbf{n}_{SR,k}$ reprezintă vectorul de zgomot Gaussian pentru utilizatorul k pentru legătura relee-destinație cu medie zero și varianță egală $\mathcal{E}[\mathbf{n}_{RD,k}\mathbf{n}_{RD,k}^H] = \sigma_{RD,k}^2$.

La stația de bază vor ajunge două copii ale semnalului original, presupuse a fi sincrone, și vor fi combinate folosind un detector de tip MRC a cărui ieșire este

$$\mathbf{y} = \alpha_1\mathbf{y}_{SD} + \alpha_2\mathbf{y}_{RD}, \quad (6)$$

unde α_1 și α_2 sunt definite pentru fiecare utilizator $k \in \{1,2, \dots, K\}$, astfel

$$\alpha_1 = \frac{\sqrt{P}\mathbf{H}_k^*}{\sigma_{SD,k}^2} \quad (7)$$

$$\alpha_2 = \frac{\sqrt{P_R}A_k\mathbf{G}_k^*\mathbf{F}_k^*}{A_k|\mathbf{F}_k|^2\sigma_{RD,k}^2 + \sigma_{RD,k}^2}. \quad (8)$$

2.2.2. Relee regenerative

În cazul releelor regenerative, s-a ales protocolul decodează-și-trimite (DF). Semnalul care ajunge la destinație este descris astfel

$$\mathbf{y}_{RD} = \sum_{k=1}^K \sqrt{P_R}\mathbf{F}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{n}_{RD,k}, \quad (9)$$

unde \mathbf{x}_k este semnalul estimat și corectat pentru utilizatorul k la releu.

La stația de bază vor ajunge două copii ale semnalului original, presupuse a fi sincrone, și vor fi combinate folosind un detector de tip MRC care respectă relația (6), unde α_1 și α_2 sunt definite pentru fiecare utilizator $k \in \{1, 2, \dots, K\}$, astfel

$$\alpha_1 = \frac{\sqrt{P}\mathbf{H}_k^*}{\sigma_{SD,k}^2}, \alpha_2 = \frac{\sqrt{P_R}\mathbf{F}_k^*}{\sigma_{RD,k}^2}. \quad (10)$$

În Figura 4 se pot observa rezultatele obținute de sistemul propus folosind releu în protocolul DF.

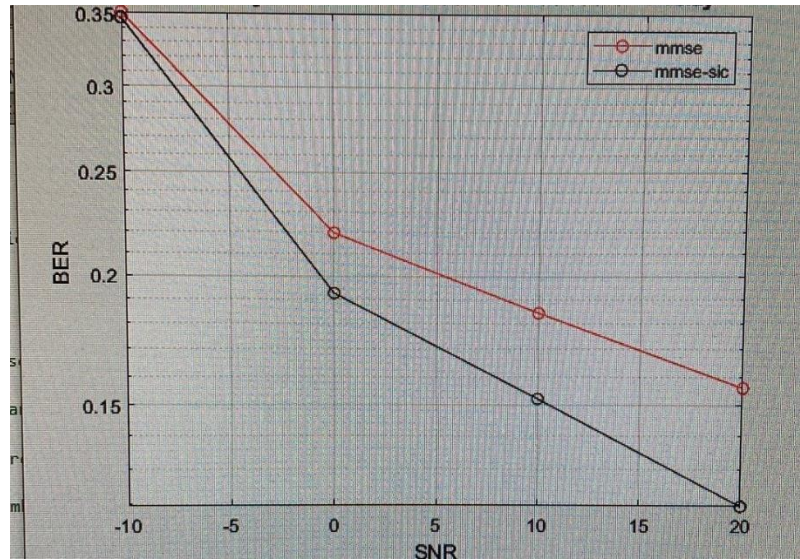


Figura 4. BER vs. RSZ pentru un sistem MIMO 1x2, K=20, L=4 și releu DF. Rezultatele obținute în urma simulărilor sunt incluse în articolul [18].

2.3 Limitări întâlnite și recomandări

Având în vedere cele prezentate mai sus și alte situații analizate în cadrul testelor efectuate până acum am constatat următoarele:

- Metoda folosită aduce un plus, și în articolul pe care îl avem în curs de scriere o să prezentăm și alte metode de împărțire a codurilor pe clustere.
- Numărul de clustere trebuie ales astfel încât să se evite ca mai mulți utilizatori să primească cod din același cluster.
- Din simulările făcute pentru sistemul cu relee, trebuie ca numărul de antene de la releu să nu fie mai mic decât cel de la stația de bază (pentru a nu degrada performanța sistemului).

3 PERSPECTIVE ULTERIOARE DE DEZVOLTARE

Următorul pas constă în a testa performanțele folosind codurile de împrăștiere complexe generate plecând la Walsh-Hadamard în absența releelor. În urma unei ședințe de proiecte la care vor participa toți membrii echipei, se va stabili arhitectura sistemului de comunicații ce urmează să fie implementat împreună cu scenariile și configurațiile în care se vor testa și evalua performanțele. Rezultatele vor fi incluse în articolul de revistă [19].

4 DISEMINARE

Avem în plan publicarea următoarelor articole, acestea urmând să fie indexate ISI Web of Science, în cel mai scurt timp:

1. C. Florea, M. Berceanu, R. Trifan și I. Marcu, "**Methods of generation of low correlation spreading codes for 5G generations systems**", Applied Sciences, IF:2.7.
2. M. Berceanu, C. Florea, "**Performance analysis of low correlation spreading codes for 5G generations systems with relays**" Telfor 2023, Belgrad, Serbia.
3. M. Berceanu, C. Florea, R. Trifan "**Comparative analysis of different methods of generation of low correlation spreading codes for 5G generations systems**", Sensors, IF: 3.9.

Bibliografie

- [1] Sinaie, M.; Wing Kwan Ng, D.; Jorswieck, E. A. Resource Allocation in NOMA Virtualized Wireless Networks Under Statistical Delay Constraints. *IEEE Wireless Commun. Let.*, vol. 7, no. 6, pp. 954-957, Dec. 2018.
- [2] Yu, Y.; Chen, H.; Li, Y.; Ding, Z.; Vucetic, B. Antenna selection for MIMO-NOMA networks. *2017 IEEE Int. Conf. on Commun. (ICC)*, Paris, 2017, pp. 1-6.
- [3] Ding, Z.; Liu, Y.; Choi, J.; Sun, Q.; Elkashlan, M.; I, C.-L.; Poor, H. V. Application of non-orthogonal multiple access in LTE and 5G networks. *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 2, pp. 185–191, Feb. 2017.

- [4] Ding, Z.; Lei, X.; Karagiannidis, G. K.; Schober, R.; Yuan, J.; Bhargava, V. A survey on non-orthogonal multiple access for 5G networks: Research challenges and future trends. *IEEE J. on Sel. Areas in Commun.*, vol. 35, no. 10, pp. 2181-2195, Oct. 2017.
- [5] Baidas, M. W.; Alsusa, E.; Hamdi, K. A. Performance analysis of downlink NOMA networks over Rayleigh fading channels. *2018 IEEE Wireless Commun. and Networking Conf. (WCNC)*, Barcelona, 2018, pp. 1-6.
- [6] D. Wan, M. Wen, X. Cheng, S. Mumtaz, and M. Guizani, "A promising non-orthogonal multiple access based networking architecture: Motivation, conception, and evolution," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 26, no. 5, pp. 152–159, Oct. 2019.
- [7] L. Dai, B. Wang, Y. Yuan, S. Han, C.-L. I, and Z. Wang, "Nonorthogonal multiple access for 5G: Solutions, challenges, opportunities, and future research trends," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 9, pp. 74–81, Sep. 2015.
- [8] B. Lin, X. Tang and Z. Ghassemlooy, "A Power Domain Sparse Code Multiple Access Scheme for Visible Light Communications," in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, no. 1, pp. 61-64, Jan. 2020, doi: 10.1109/LWC.2019.2941853.
- [9] N. M. Balasubramanya, A. Gupta and M. Sellathurai, "Combining Code-Domain and Power-Domain NOMA for Supporting Higher Number of Users," 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/GLOCOM.2018.8647770.
- [10] S. M. R. Islam, N. Avazov, O. A. Dobre, and K.-S. Kwak, "Power domain non-orthogonal multiple access (NOMA) in 5G systems: Potentials and challenges," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 19, no. 2, pp. 721–742, 2nd Quart., 2017.
- [11] Z. Ding, F. Adachi, and H. V. Poor, "The application of MIMO to nonorthogonal multiple access," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 1, pp. 537–552, Jan. 2016.
- [12] Z. Ding, L. Dai, and H. V. Poor, "MIMO-NOMA design for small packet transmission in the Internet of Things," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1393–1405, 2016.
- [13] Y. Liu, Z. Ding, M. ElKashlan, and H. V. Poor, "Cooperative nonorthogonal multiple access with simultaneous wireless information and power transfer," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 34, no. 4, pp. 938–953, Apr. 2016.
- [14] S. Zhang, X. Xu, L. Lu, Y. Wu, G. He, Y. Chen, "Sparse code multiple access: An energy efficient uplink approach for 5G wireless systems," in *Proc. IEEE Glob. Commun. Conf.*, 2015, pp. 4782–4787.
- [15] Z. Wei, J. Yuan, D. W. K. Ng, M. ElKashlan, and Z. Ding, "A survey of downlink non-orthogonal multiple access for 5G wireless communication networks," *ZTE Commun.*, vol. 14, no. 4, pp. 17–26, Oct. 2016.
- [16] C. Florea, M. Berceanu, R. Trifan și I. Marcu, "**Methods of generation of low correlation spreading codes for 5G generations systems**", Applied Sciences, IF:2.7.
- [17] M. Berceanu, C. Florea, "**Performance analysis of low correlation spreading codes for 5G generations systems with relays**" Telfor 2023, Belgrad, Serbia.
- [18] M. Berceanu, C. Florea, R. Trifan "**Comparative analysis of different methods of generation of low correlation spreading codes for 5G generations systems**", Sensors, IF: 3.9.

