

**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)**

---

<b>Termen</b>	<b>Decembrie 2022</b>
<b>Autori</b>	<b>Mădălina-Georgiana Berceanu,  Carmen Florea,  Răzvan Crăciunescu,  Alexandru Badea.</b>
<b>Natură</b>	<b>Raport intermediar</b>

<b>1 INTRODUCERE</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Obiectivele proiectului</b>	<b>3</b>
<b>1.2 Obiectivele raportului curent</b>	<b>3</b>
<b>1.3 Rezumat</b>	<b>4</b>
<b>2 EVALUAREA PERFORMANTELOR SISTEMULUI DE COMUNICAȚII PROPUȘ SPRE ANALIZĂ ÎN DIVERSE SCENARII ȘI CONFIGURAȚII</b>	<b>4</b>
<b>2.2 Analiza și evaluarea în performanță pentru codurile de împrăștiere complexe PN</b>	<b>5</b>
<b>2.3 Analiza și evaluarea în performanță pentru codurile de împrăștiere complexe Walsh-Hadamard în prezența releelor</b>	<b>8</b>
<b>3 PERSPECTIVE ULTERIOARE DE DEZVOLTARE</b>	<b>9</b>
<b>4 DISEMINARE</b>	<b>10</b>
<b>Bibliografie</b>	<b>10</b>

# **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 5 decembrie 2022, s-a avut în vedere îndeplinirea obiectivelor specifice care corespund WP2, conform diagramei Gantt din Fig. 1:

- determinarea de 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;
- specificarea structurii și parametrilor sistemului;
- stabilirea scenariilor de testare în concordanță cu cerințele modelului de sistem propus;

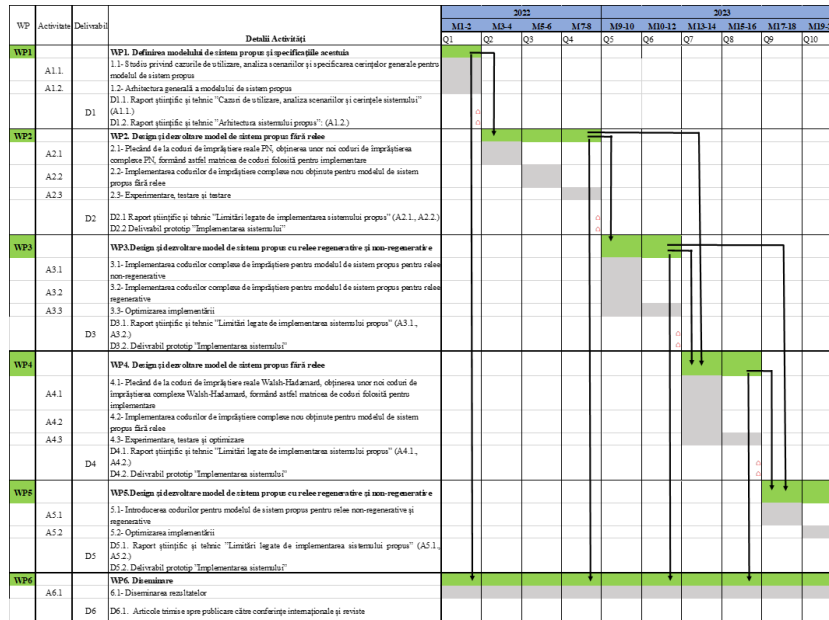


Fig. 1 Diagrama Gantt

### 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 face o prezentare a rezultatelor obținute până în prezent: modalitate de generare de coduri complexe, plecând de la codurile PN reale, cu corelație mică și limitările întâlnite în diferite scenarii analizate.

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

## **2 EVALUAREA PERFORMANTELOR SISTEMULUI DE COMUNICAȚII PROPUȘ SPRE ANALIZĂ ÎN DIVERSE SCENARII ȘI CONFIGURAȚII**

Așa cum a fost menționat în raportul din luna iulie 2022, NOMA în domeniul cod, reprezintă o soluție de luat în vedere pentru noile sisteme de generația a 5-a. Un exemplu bine-cunoscut din această categorie este accesul multiplu cu acces simultan (Multi-User Shared-Access – MUSA) [1]. Într-un sistem MUSA, simbolurile fiecărui utilizator sunt împrăștiate folosind coduri complexe generate dintr-un set de valori. Dacă elementul real sau cel imaginar al codului de împrăștiere non-binar aparține setului  $\{1, -1\}$  există 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 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 utilizatorilor. Un dezavantaj este faptul că aceste coduri 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 de a deteriora QoS pentru unii utilizatori.

Pentru validarea metodei de generare a codurilor de împrăștiere, metodă ce urmează să fie prezentată în secțiunea 2.1, s-a folosit modelul de sistem prezentat în Fig. 1. 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).

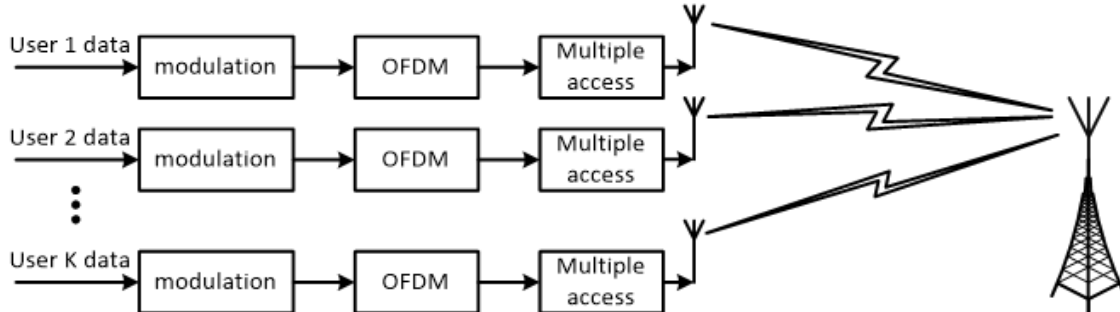


Fig. 1 Modelul de sistem propus pentru implementare în mediul de simulare Matlab

## 2.1 Metode de generare de coduri de împrăștiere cu corelație scăzută plecând de la codurile PN

Sistemele fără fir pot fi clasificate și în funcție de încărcare. Dacă numărul utilizatorilor, notat în continuare cu  $K$ , este mai mic decât lungimea codului,  $L$ , sistemul este subîncărcat, dacă  $K=L$  este încărcat 100%, și este supraîncărcat atunci când  $K>L$ . Dacă pentru primele două tipuri de sisteme se pot folosi și coduri PN reale (am arătat în primul raport că PN real și PN complex oferă aceleași performanțe când  $K=L$ ), când sistemul este supraîncărcat folosirea codurilor PN reale nu mai este posibilă deoarece restul de  $K-L$  utilizatori ar fi 100% corelați cu alți utilizatori, cu alte cuvinte ar trebui să fie refolosite coduri PN. Având în vedere acestea în articolul [2] am propus un algoritm de generare a  $K$  coduri de împrăștiere și corelația de 100% să fie evitată. Metoda este prezentată mai departe:

- I. Se generează codurile PN reale de lungime  $L$  (în acest fel se vor obține coduri cu corelația egală cu  $1/L$ ).
- II. Se înmulțesc codurile obținute cu o valoare din setul  $\{i, -i, 1+i, 1-i, -1+i, -1-i\}$  (se vor obține astfel  $L$  coduri complexe cu corelația egală cu  $1/L$ )
- III. Se generează coduri de împrăștiere arbitrar complexe folosind valorile din setul inițial, fără valoarea utilizată în pasul II, pentru restul utilizatorilor,  $K-L$ .

Pentru ca evita ca toți utilizatorii să folosească aceeași subpurtătoare în același timp, se poate pune condiția ca codurile generate la pasul III să conțină valoarea 0. Valorile 0 din secvențe conduc la o interferență între coduri atenuată.

## 2.2 Analiza și evaluarea în performanță pentru codurile de împrăștiere complexe PN

În următoarele simulări se prezintă câteva scenarii analizate, în care a fost aplicată metoda noastră de generare a codurilor de separare a utilizatorilor. Rezultatele obținute sunt comparate cu cele obținute de o generare aleatoare a codurilor MUSA. În toate aceste scenarii utilizatorii au o singură antenă, iar stația de bază care deservește toți utilizatorii are 4 antene. Acest lucru a fost făcut pentru a reduce complexitatea implementării stației de bază.

În Fig. 2 sunt prezentate rezultatele obținute de modelul de sistem propus în Fig. 1 atunci când este supraîncărcat, 129%. În articolul [2] am prezentat și cazul unei încărcări de 200%. Se poate observa în scenariul prezentat că algoritmul propus de generare a codurilor de împrăștiere (coduri de împrăștiere complexe PN) este mai eficient decât utilizarea codurilor de împrăștiere complexe generate aleatoriu. Cum era de așteptat, când sistemul este utilizat de mai puțini utilizatori, performanța acestuia crește. Acest lucru se întâmplă deoarece  $L$  utilizatori sunt separați cu coduri de împrăștiere care au o corelație scăzută, iar corelarea codurilor celorlalți utilizatori  $K-L$  depinde de structurile codurilor alocate. În măsura în care numărul utilizatorilor cu structură aleatorie a codurilor de împrăștiere alocate este aproape egal cu numărul utilizatorilor corelați cu o corelație scăzută,  $K-L = L$ , este necesară o îmbunătățire a algoritmului propus.

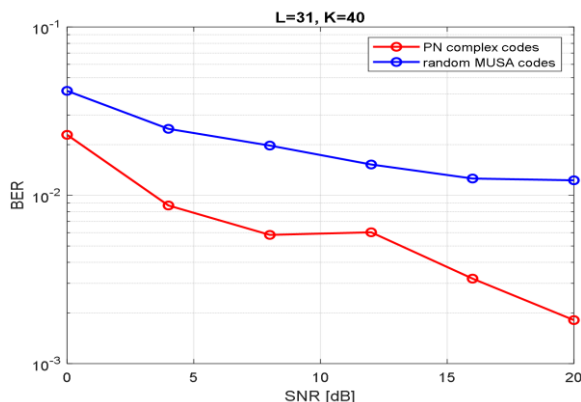


Fig. 2 BER pentru un sistem supraîncărcat, 129%

În cel de-al doilea scenariu analizat s-a menținut un raport semnal-zgomot (RSZ) constant, iar numărul de utilizatori activi a fost variat de la 31 la 61, pentru a vedea impactul supraîncărcării în performanța sistemului. Rezultatele prezentate în Fig. 3 sunt pentru RSZ egal cu 10 dB. Se poate observa că și în acest scenariu algoritmul propus atinge performanțe mai bune decât în cazul în care codurile sunt create în mod arbitrar.

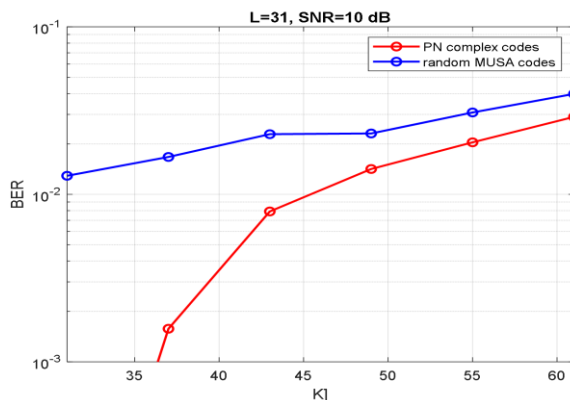
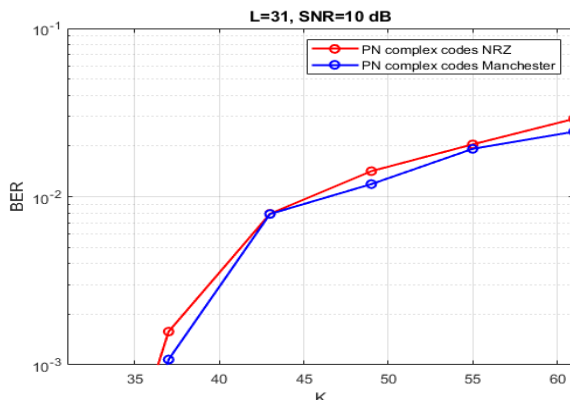


Fig. 3 BER pentru un sistem supraîncărcat, RSZ=10dB

Pentru articolul de revistă [3] s-au efectuat niște schimbări și anume, în toate aceste scenarii prezentate anterior s-a folosit modulația în banda de bază (cunoscută și sub denumirea de coduri de linie) de tip ne-întoarcere la zero (Non-return-to-Zero - NRZ). În Fig. 4 s-a schimbat codarea NRZ cu Manchester, și se observă o îmbunătățire a performanțelor obținute. S-a folosit scenariul

2 prezentat anterior, doar că în ambele simulări s-au folosit codurile generate după algoritmul propus.



**Fig. 4** BER pentru un sistem supraîncărcat, RSZ=10dB - comparație NRZ și Manchester

În continuare se descrie o altă metodă de generare a codurilor de împrăștiere complexe plecând de la codurile PN reale, bazându-ne pe faptul că funcțiile cosinus și sinus sunt ortogonale.

- I. Se generează codurile PN reale de lungime  $L$  (în acest fel se vor obține  $L$  coduri cu corelația egală cu  $1/L$ ).
- II. Apoi se aplică  $S = e^{ix} = \cos x + i \cdot \sin x$ , unde  $x$  este matricea generată la pasul anterior, iar  $S$  este noua matrice de coduri cu corelație scăzută,  $1/L$ . Noile coduri au partea reală 0,5403, iar partea imaginară -0,8415 sau 0,8415. Cu această metodă se generează  $L$  coduri.

## 2.2 Limitări întâlnite și recomandări

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

- este de evitat o supraîncărcare de 200% a sistemului;
- pentru a îmbunătăți rezultatele este recomandată folosirea codării Manchester în loc de NRZ;
- în articole scrise de autorii acestui raport s-a arătat că este indicat să se folosească și codarea de canal. De exemplu pentru sistemele de generația a 5-a, LDPC.

Așa cum am menționat mai sus, metoda 2 de generare a codurilor complexe se poate aplica doar pentru  $K=L$  utilizatori (sistem încărcat 100%). Dacă avem supraîncărcare și pentru restul de  $K-L$  utilizatori folosim pasul 3 din metoda 1, prezentată în secțiunea 2.1, rezultatele obținute nu sunt încurajatoare, așa cum se poate observa în Fig. 5. Motivul este că setul de valori cu care sunt create codurile pentru primii  $L$  utilizatori diferă pentru restul de  $K-L$ . Aceste detalii sunt o parte din rezultatele ce apar în articolul de revistă aflat în lucru [3].

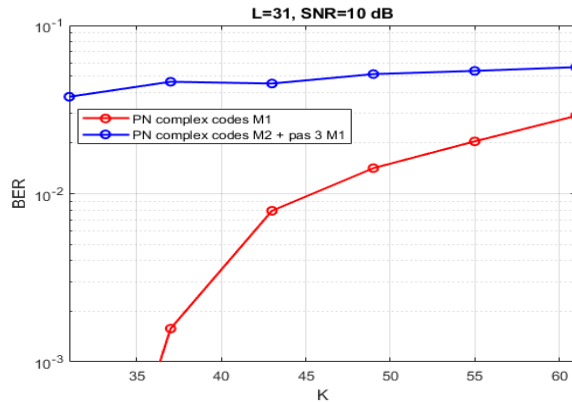


Fig. 5 BER pentru un sistem supraîncărcat, SNR=10dB - comparație M1 și M2

### 2.3 Analiza și evaluarea în performanță pentru codurile de împrăștiere complexe Walsh-Hadamard în prezența releelor

În această secțiune este prezentată performanța unui sistem de comunicație fără fir, pe legătura ascendentă, folosind o tehnică de acces multiplu cu coduri complexe de împrăștiere obținute din coduri de împrăștiere Walsh-Hadamard ortogonale. Se respectă în mare parte modelul de sistem propus în Fig. 1, doar că în acest caz a fost introdus și releul și este prezentat în Fig. 6. Rezultatele obținute în urma simulărilor sunt introduse în articolul [4].

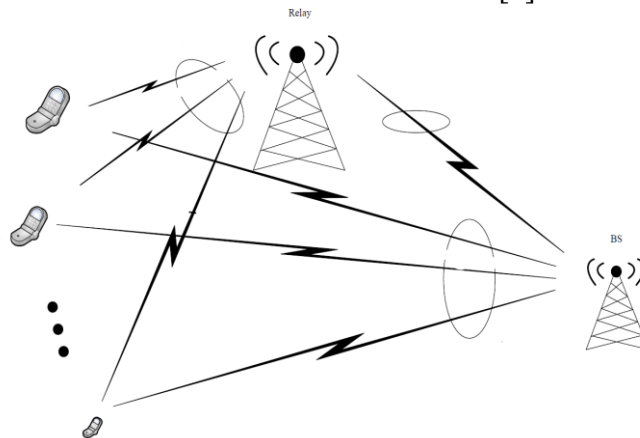
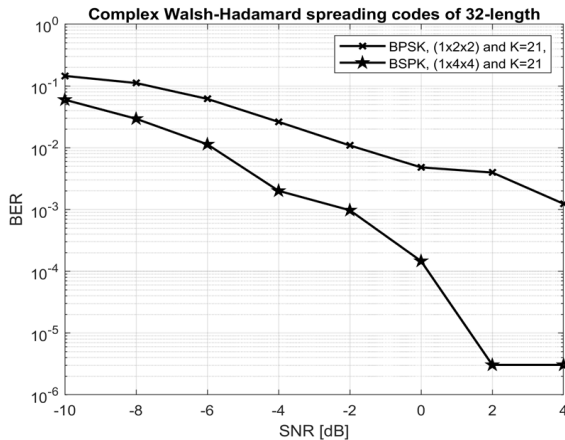


Fig. 6 Modelul de sistem propus pentru implementare în mediul de simulare Matlab

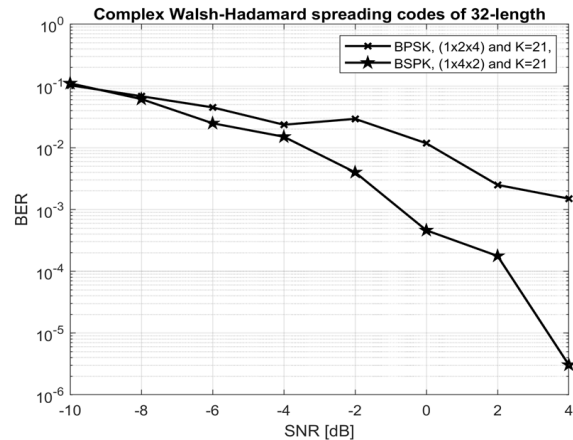
Fig. 7 reprezintă primele două scenarii în care este evaluată performanța sistemului propus. Au fost utilizate coduri complexe de împrăștiere Walsh-Hadamard de lungime 32 obținute urmând pașii din algoritmul prezentat în articolul [5]. Crescând numărul de antene la releu și la receptor, rezultatele sunt mai bune datorită câștigului obținut din diversitatea spațială oferită de tehnica MIMO, în timp ce numărul utilizatorilor activi rămâne același. O altă observație care poate fi făcută este cea legată de aceste coduri complexe de împrăștiere și de numărul de antene la receptor – chiar dacă numărul acestora este mic, iar numărul de utilizatori este mai mare decât numărul de antene de recepție, performanța este totuși una bună datorită ortogonalității codurilor de împrăștiere Walsh-Hadamard.



Mai mult, în Fig. 8 a fost simulată situația în care numărul de antene la receptor este mai mic sau mai mare decât numărul de antene la rețea când numărul de utilizatori este încă 21 (ca și în Fig. 7).

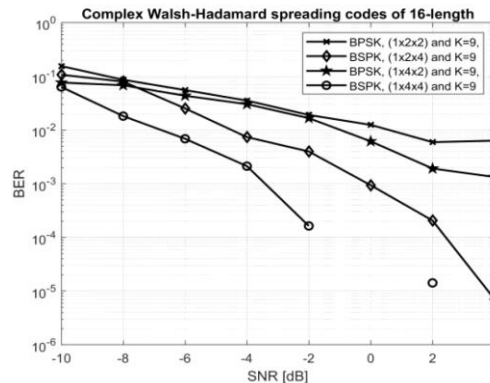


**Fig. 7** BER vs. RSZ pentru (1x2x2) și (1x4x4) MIMO, 21 utilizatori activi



**Fig. 8** BER vs. RSZ pentru (1x2x4) și (1x4x2) MIMO, 21 utilizatori activi

Prin urmare, dacă numărul de utilizatori scade de la 21 la 9, lungimea codului este 16 și nu 32, se obține Fig. 9. Așa cum era de așteptat și ca în figurile de mai sus, cea mai slabă performanță este obținută cu o configurație MIMO (1x2x2), iar cea mai bună performanță este obținută atunci când se utilizează o configurație MIMO (1x4x4). Pentru un SNR fix de -4dB, BER pentru configurația MIMO (1x2x2) este 0,0354487 și pentru configurația MIMO (1x4x4) este 0,00212963.



**Fig. 9** BER versus RSZ pentru diferite configurații MIMO, 9 utilizatori activi

### **3 PERSPECTIVE ULTERIOARE DE DEZVOLTARE**

Următorul pas avut în vedere este acela de a începe testarea performanțelor în prezența releelor regenerative și non-regenerative folosind codurile de împrăștiere complexe generate plecând la PN. În urma unei ședințe de proiect 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.

#### **4 DISEMINARE**

Anul acesta avem publicate 2 articole de conferință, acestea urmând să fie indexate ISI Web of Science și avem în lucru un articol pe care dorim să-l trimitem la o revistă de tip MDPI în cel mai scurt timp :

1. C. Florea, M. Berceanu, A. Badea și O. Fratu, "**Low correlation spreading codes for MUSA systems**," ATOMN 2022, 25-28 august 2022, Constanța, România.
2. M. Berceanu, C. Florea, R. Crăciunescu, "**The performance of complex spreading codes within a Massive MIMO OFDM-based system with relays**" ATOMN 2022, 25-28 august 2022, Constanța, România.
3. C. Florea, M. Berceanu, R. Crăciunescu și I. Marcu, "**Methods of generation of low correlation spreading codes for 5G generations systems**".

#### **Bibliografie**

- [1] Y. Tao, L. Liu, S. Liu și Z. Zhang, „A survey: Several technologies of non-orthogonal transmission for 5G,” *China Communications*, vol. 12, nr. 10, pp. 1-15, Oct. 2015.
- [2] C. Florea, M. Berceanu, A. Badea și O. Fratu, "**Low correlation spreading codes for MUSA systems**," ATOMN 2022, 25-28 august 2022, Constanța, România.
- [3] C. Florea, M. Berceanu, R. Crăciunescu și I. Marcu, "**Methods of generation of low correlation spreading codes for 5G generations systems**".
- [4] M. Berceanu, C. Florea, R. Crăciunescu, "**The performance of complex spreading codes within a Massive MIMO OFDM-based system with relays**" ATOMN 2022, 25-28 august 2022, Constanța, România.
- [5] Berceanu, M.-G.; Florea, C.; Halunga, S. Performance Comparison of Massive MIMO System with Orthogonal and Nonorthogonal Multiple Access for Uplink in 5G Systems. *Appl. Sci.* 2020, 10, 7139. <https://doi.org/10.3390/app10207139>