

UNIVERSITATEA „POLITEHNICA” din BUCUREȘTI

ȘCOALA DOCTORALĂ ETTI-B

Nr. Decizie 566. din 25.09.2020

TEZĂ DE DOCTORAT

**OPTIMIZAREA PERFORMANȚELOR SISTEMELOR DE
COMUNICAȚII DIGITALE**

**OPTIMIZING THE PERFORMANCE OF DIGITAL
COMMUNICATIONS SYSTEMS**

Doctorand: **Ing. Mădălina-Georgiana Berceanu**

COMISIA DE DOCTORAT

| | | | |
|------------------------|---|-------|--|
| Președinte | Prof. Dr. Ing. Ion Marghescu | de la | Univ. Politehnica București |
| Conducător de doctorat | Prof. Dr. Ing. Simona Halunga | de la | Univ. Politehnica București |
| Referent | Prof. Dr. Ing. Teodor Petrescu | de la | Univ. Politehnica București |
| Referent | Prof. Dr. Ing. Ioan Nicolăescu | de la | Academia Tehnică Militară “Ferdinand I” |
| Referent | Prof. Dr. Ing. Gheorghe Gavriloaia | de la | Univ. din Pitești |

BUCUREȘTI 2020

Cuprins

| | |
|--|----------|
| Capitolul 1 Introducere | 4 |
| 1.1 Prezentarea domeniului tezei de doctorat | 4 |
| 1.2 Scopul tezei de doctorat | 4 |
| 1.3 Conținutul tezei de doctorat | 4 |
| Capitolul 2 Tehnici de modulație..... | 5 |
| 2.1 Modulația cu comutare de fază | 5 |
| 2.1.1 Modulația cu comutare de fază a semnalelor binare (BPSK)..... | 5 |
| 2.1.2 Modulația cu comutare de fază în cuadratură (QPSK)..... | 5 |
| 2.1.3 Semnale cu modulație în amplitudine în cuadratură (QAM) | 5 |
| 2.2 Multiplexarea prin diviziune în frecvență cu purtătoare ortogonale..... | 5 |
| 2.2.1 Principiile de bază | 5 |
| 2.2.2 Implementarea unui sistem OFDM | 5 |
| Capitolul 3 Modelarea canalului radio | 6 |
| 3.1 Elemente care conduc la deteriorarea calității semnalului..... | 6 |
| 3.2 Fluctuațiile de anvelopă și de fază ale semnalului..... | 6 |
| 3.3 Modelarea canalului..... | 6 |
| 3.4 Clasificarea tipurilor de fading | 6 |
| 3.4.1 Fading de scară redusă și fading de scară largă..... | 7 |
| 3.5 Diversitate | 7 |
| 3.5.1 Tehnici de diversitate..... | 7 |
| 3.5.2 Tehnici de combinare a diversității | 7 |
| 3.6 Multiplexare spațială..... | 7 |
| 3.7 Sisteme cu mai multe antene..... | 7 |
| 3.7.1 Canalul SISO | 7 |
| 3.7.2 Canalul SIMO..... | 7 |
| 3.7.3 Canalul MISO..... | 8 |
| 3.7.4 Canalul MIMO | 8 |
| 3.7.5 Canalul MIMO cu mai mulți utilizatori..... | 8 |
| 3.7.6 Canalul MIMO masiv | 8 |
| 3.8 Sisteme cooperative | 8 |
| 3.8.1 Avantajele și dezavantajele cooperării în comunicații fără fir | 9 |
| 3.8.2 Compromisuri pentru performanță | 9 |
| 3.8.3 Tehnici de cooperare | 9 |
| Capitolul 4 Analiza performanțelor unui sistem MIMO masiv în prezența CDMA..... | 9 |
| 4.1 Introducere | 9 |
| 4.2 Accesul multiplu | 9 |
| 4.2.1 Acces multiplu cu diviziune în cod cu secvență directă (DS-CDMA)..... | 9 |
| 4.3 Studiu de caz – Analiza performanțelor unui sistem MIMO masiv în prezența CDMA...10 | |
| 4.3.1 Influența numărului de antene/configurații MIMO asupra performanțelor unui sistem CDMA ce folosește coduri de împrăștiere Walsh și PN în prezența fadingului Rice.....10 | |
| 4.3.2. Influența numărului de antene / configurații MIMO asupra performanțelor unui sistem CDMA ce folosește coduri de împrăștiere Walsh și PN în prezența fadingului Rayleigh când se transmit imagini.....10 | |
| 4.3.3 Influența numărului de antene / configurații MIMO asupra performanțelor unui sistem CDMA ce folosește coduri de împrăștiere Walsh în prezența fadingului Rice.....10 | |

| | |
|--|-------------|
| 4.3.4 Influența numărului de antene / configurații MIMO asupra performanțelor unui sistem CDMA ce folosește coduri de împrăștiere PN în prezența fadingului Rice..... | 11 |
| 4.3.5 Influența numărului de antene/configurații MIMO asupra performanțelor unui sistem CDMA ce folosește coduri de împrăștiere Walsh și PN în prezența fadingului Rice când se transmit imagini..... | 11 |
| 4.4 Concluzii | 12 |
| Capitolul 5 Analiza performanțelor unui sistem MIMO masiv în prezența OFDM și LDPC. | 12 |
| 5.1 Introducere | 12 |
| 5.2 Influența numărului de antene / configurații MIMO asupra performanțelor unui sistem ce folosește modulația OFDM și detectoarele MMSE și MMSE-SIC | 12 |
| 5.2.1 Performanțele unui sistem MIMO Masiv fără OFDM cu detector MMSE..... | 12 |
| 5.2.2 Performanțele unui sistem MIMO Masiv cu OFDM cu detector MMSE | 13 |
| 5.2.3 Performanțele unui sistem MIMO Masiv cu OFDM cu detector MMSE-SIC..... | 13 |
| 5.3 Influența numărului de antene/configurații MIMO masiv asupra performanțelor unui sistem ce folosește codarea de canal LDPC | 13 |
| 5.3.1 Performanțele unui sistem MIMO masiv cu LDPC cu număr mic de utilizatori .. | 14 |
| 5.3.2 Performanța unui sistem MIMO Masiv cu LDPC cu număr mare de utilizatori .. | 14 |
| 5.4 Concluzii | 14 |
| Capitolul 6 Analiza performanțelor unui sistem MIMO masiv în prezența LDPC, OFDM și releu | 15 |
| 6.1 Introducere | 15 |
| 6.2 Protocolul Amplifică și trimite (AF)..... | 15 |
| 6.3 Protocolul Decodează și Trimite (DF)..... | 15 |
| 6.4 Influența numărului de antene/configurații MIMO masiv asupra performanțelor unui sistem cu un releu AF și DF între sursă și destinație | 15 |
| 6.5 Influența numărului de antene/configurații MIMO masiv asupra performanțelor unui sistem cu un releu DF între sursă și destinație când terminalul mobil se află sau nu în aria de acoperire a stației de bază | 16 |
| 6.5.1 Terminalele mobile se află în aria de acoperire a stației de bază | 16 |
| 6.5.2 Terminalele mobile se află în afara ariei de acoperire a stației de bază | 17 |
| 6.6 Influența numărului de antene/configurații MIMO masiv asupra performanțelor unui sistem în prezența OFDM cu un releu AF între sursă și destinație | 17 |
| 6.7 Influența numărului de antene/configurații MIMO masiv asupra performanțelor unui sistem în prezența LDPC,OFDM, cu un releu AF între sursă și destinație și detectoarele MMSE și MMSE-SIC. | 18 |
| 6.8 Concluzii | 18 |
| Capitolul 7 Accesul multiplu cu acces simultan | 18 |
| 7.1 MUSA..... | 18 |
| 7.2 Influența numărului de antene/configurații MIMO masiv asupra performanțelor unui sistem în prezența LDPC, OFDM, cu un releu DF între sursă și destinație, folosind accesul multiplu MUSA și detectorul MMSE..... | 19 |
| 7.3 Concluzii | 19 |
| Capitolul 8 Concluzii | 20 |
| 8.1 Rezultate obținute | 20 |
| 8.2 Contribuții originale..... | 20 |
| 8.3 Lista lucrărilor publicate | 21 |
| 8.4 Perspective de dezvoltare ulterioară | 22 |
| Bibliografie selectivă | 2222 |

Capitolul 1 - Introducere

1.1 Prezentarea domeniului tezei de doctorat

Sistemele de comunicații fără fir au înregistrat o evoluție rapidă ca volum și ca gamă de servicii. Un punct forte al acestora îl constituie îmbunătățirea eficienței spectrale pentru a susține un număr foarte mare de utilizatori și rate de date foarte mari. O abordare promițătoare este utilizarea mai multor antene la transmisie și la recepție (MIMO). Folosirea spectrului împrăștiat bazat pe accesul multiplu cu diviziune în cod (CDMA) reprezintă o altă abordare prin care se obține creșterea eficienței spectrale. Lucrarea de față abordează și tehnica de acces multiplu cu acces simultan al utilizatorilor (MUSA). S-a dezvoltat un program de identificare a unei matrici de coduri perfect ortogonale, completarea acesteia cu coduri care au o corelație scăzută. S-a propus o nouă metodă de obținere a codurilor de împrăștiere complexe, pornind de la coduri de împrăștiere reale. Cooperarea este o modalitate eficientă prin care legătura de comunicație a unui utilizator este îmbunătățită într-un mod susținut cu ajutorul releelor. Pentru a combate efectele fadingului multicel care apar pe legătura de comunicație se folosește multiplexarea cu diviziune în frecvență cu purtătoare ortogonale (OFDM).

1.2 Scopul tezei de doctorat

Prezenta teză de doctorat își propune analiza calității informației care ajunge la destinație după parcurgerea lanțului de comunicație atunci când sunt introduse diverse tehnologii, luate în discuție în dezvoltarea 5G. Se pornește de la un sistem MIMO afectat de diverse tipuri de fading și folosește CDMA atunci când se transmit date aleatoare sau imagini. Ca mediu de simulare se folosește Matlab, iar performanțele sunt analizate interpretând grafice în care sunt reprezentate rate ale erorii de bit (BER) versus raportul semnal-zgomot (RSZ) sau indexul de similaritate mediu (MSSIM). Pe lângă CDMA, se introduce și OFDM într-un sistem în care se variază numărul antenelor la recepție și numărul utilizatorilor pentru a vedea ce schimbări se produc și în ce condiții. Urmează introducerea codării de canal (LDPC) și a releelor. Având în vedere limitările introduse de CDMA, pentru o îmbunătățire și mai mare a sistemului dezvoltat până în acest moment, s-a implementat o nouă tehnică de acces multiplu MUSA, a cărei performanță este evidențiată prin comparație cu CDMA și a cărei dezvoltare a avut ca punct de start CDMA.

1.3 Conținutul tezei de doctorat

Capitolul 2 și *Capitolul 3* fac o mică introducere teoretică a trei tehnici de modulație utilizate și în partea practică și a OFDM. Se aduce în discuție elementele care afectează calitatea semnalului pe canalul de comunicație, și se prezintă tehnologia MIMO. În ultima parte a acestui capitol este descris conceptul de cooperare. *Capitolul 4* începe cu o scurtă introducere legată de tehnica CDMA folosită într-un sistem cu mai mulți utilizatori atunci când fiecare utilizator transmite un șir de biți aleator sau o imagine alb-negru. *Capitolul 5* face o analiză a performanțelor codării LDPC luând în considerare tehnica MIMO masiv, iar la recepție s-au luat în considerare două detectoare pentru estimarea informației transmise: minimizarea erorii pătratice medii (MMSE) și minimizarea erorii pătratice medii cu suprimarea treptată a interferențelor (MMSE-SIC). *Capitolul 6* începe cu o prezentare teoretică a celor două protocoale utilizate în prezenta teză de doctorat, amplifică-și-

trimite (AF) și decodează-și-trimite (DF) în cazul, a căror performanță va fi testată prin intermediul unor simulări. *Capitolul 7* începe cu o introducere teoretică pentru MUSA, urmată de o testare a performanțelor prin comparație cu CDMA. Se prezintă o nouă metodă de obținere a codurilor de împrăștiere complexe pornind de la codurile de împrăștiere PN. *Capitolul 8* sumarizează întreaga teză de doctorat prezentând concluziile în urma descrierilor teoretice și practice, idei dezvoltări ulterioare precum și contribuții originale și articole ale autorului, folosite în redactarea tezei.

Capitolul 2 - Tehnici de modulație

2.1 Modulația cu comutare de fază

Comutarea de fază este o tehnică de modulație digitală prin care faza semnalului purtător analogic este folosită pentru a reprezenta informație digitală binară (valorile binare de 0 și 1).

2.1.1 Modulația cu comutare de fază a semnalelor binare (BPSK)

BPSK este o tehnică de modulație digitală în care se transmite un singur bit per simbol, fie 0 sau 1. Pentru acest tip de modulație se folosesc două stări diferite ale fazei.

2.1.2 Modulația cu comutare de fază în cuadratură (QPSK)

QPSK este o modulație digitală în care se transmit doi biți per simbol, adică se vor transmite 00, 01, 10 și 11. Pentru acest tip de modulație se folosesc patru stări diferite ale fazei.

2.1.3 Semnale cu modulație în amplitudine în cuadratură (QAM)

Un semnal QAM este un semnal în care două purtătoare deplasate în fază cu $\frac{\pi}{2}$ radiani între ele sunt modulate, iar semnalul rezultat prezintă o variație atât în amplitudine, cât și în fază.

2.2 Multiplexarea prin diviziune în frecvență cu purtătoare ortogonale

Modulația multi-purtătoare este o tehnică prin care sunt transmise date pe mai multe purtătoare, altfel spus, fluxul de date cu o rată mai mare care trebuie transmis este divizat în mai multe subfluxuri de date de rate mai mici, fiecare fiind folosit pentru a modula o subpurtătoare individuală [1]. Există mai multe forme de modulații multi-purtătoare, fiecare având propriile avantaje, moderând influența factorilor perturbatori prin diferite abordări, însă în partea experimentală a acestei teze de doctorat s-a ales OFDM.

2.2.1 Principiile de bază

OFDM împarte întreg canalul afectat de fading selectiv în frecvență în subcanale de bandă îngustă afectat de fading plat (sau subpurtătoare) în care datele sunt transmise în paralel și nu sunt afectate de interferența inter-simbol datorită perioadei de simbol mare [11].

2.2.2 Implementarea unui sistem OFDM

La intrarea unui astfel de sistem se aplică un semnal de date binar serial care intră într-un bloc de modulare BPSK, iar la ieșirea acestuia va fi un semnal, încă sub formă serială, introdus într-un convertor serie-paralel. Prin urmare, semnalul OFDM-BPSK este

$$s_{OFDM-BPSK}^{bb}(t) = \sum_{l=0}^{L-1} s_l^{bb}(t) \cos\left(l \frac{2\pi}{T_s} t\right) \quad (2.54)$$

unde notația “bb” se referă la un semnal în banda de bază, $s_l^{bb}(t)$ semnalul obținut în urma multiplicării datelor cu subpurtătoarea asociată.

Urmând principiul prezentat la punctul anterior, semnalul OFDM-QAM transmis este

$$s_{OFDM-QAM}^{bb}(t) = \sum_{l=0}^{L-1} s_l^{bb}(t) = \sum_{l=0}^{L-1} (A_l + jB_l) e^{jl\Omega t}, \quad (2.59)$$

relație valabilă în intervalul $[0, T_s]$ și simbolurile QAM, A_l și B_l , constante pe durata $T_{s_QAM} = 2NT_b$, înainte de conversia serie-paralel.

Capitolul 3 - Modelarea canalului radio

3.1 Elemente care conduc la deteriorarea calității semnalului

Semnalul care parcurge un lanț de comunicație poate ajunge la recepție modificat de următoarele efecte [2][3][4]: *atenuarea de propagare*, *umbrirea*, *fadingul*. Alte fenomene care favorizează apariția fadingului sunt deviația/efectul Doppler, reflexia, difracția și împrăștierea.

3.2 Fluctuațiile de anvelopă și de fază ale semnalului

Presupunem că există multiple căi de propagare a unui semnal. Fiecărei căi îi sunt asociate întârzierea de propagare și factorul de atenuare. Prin urmare, semnalul recepționat este

$$r(t) = \operatorname{Re} \left\{ \left[\sum_i \alpha_i(t) e^{-j2\pi f_0 \tau_i(t)} g(t - \tau_i(t)) \right] e^{j2\pi f_0 t} \right\}, \quad (3.10)$$

unde $g(t)$ este anvelopa complexă a semnalului transmis, $\alpha_i(t)$ este factorul de atenuare pentru semnalul recepționat pe calea i , $\tau_i(t)$ este întârzierea de propagare pe calea i . Din relația (3.10) reiese că echivalentul de joasă frecvență al semnalului recepționat (sau anvelopa complexă) este

$$g_c(t) = \sum_i \alpha_i(t) e^{-j2\pi f_0 \tau_i(t)} g(t - \tau_i(t)). \quad (3.11)$$

3.3 Modelarea canalului

Caracteristicile unui canal de comunicație pot fi evidențiate cu ajutorul funcției pondere și funcției de transfer. Așadar, conform relației (3.10), semnalul recepționat este obținut în urma unei operații de convoluție dintre semnalul din banda de bază, aplicat la intrare $s(t)$, și de echivalentul de joasă frecvență al funcției pondere $h(\tau, t)$, definită ca [5]

$$h(\tau; t) = \sum_i \alpha_i(t) e^{-j2\pi f_0 \tau_i(t)} \delta(\tau - \tau_i(t)). \quad (3.15)$$

Aplicând transformata Fourier pentru $h(\tau; t)$, atunci echivalentul de joasă frecvență este [5]

$$H(f; t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau; t) e^{-j2\pi f_0 \tau} d\tau. \quad (3.19)$$

3.4 Clasificarea tipurilor de fading

Cei doi parametri care sunt folosiți pentru clasificarea canalelor afectate de fading sunt banda de coerență și timpul de coerență. Atunci, se poate face următoarea clasificare a fadingului:

fadingul lent ($T_C \gg T_S$ și $B_D \ll B_S$) și *fadingul rapid* ($T_C < T_S$ și $B_D > B_S$); *fadingul plat* ($B_C \gg B_S$ și $\tau \ll T_S$) și *fadingul selectiv în frecvență* ($B_C < B_S$ și $\tau > T_S$) [6][7][8]. Se mai poate face o clasificare, mai generală, a fadingului astfel: *fading de scară redusă* și *fading de scară largă* [6][7][9].

3.4.1 Fading de scară redusă și fading de scară largă

Fadingul de scară redusă se referă la schimbările rapide ale amplitudinii și fazei pe o perioadă de timp foarte scurtă sau pe o distanță foarte mică. Fadingul de scară redusă este numit și fading Rayleigh pentru că atunci când numărul versiunilor semnalului transmis care ajung la recepție, la momente de timp ușor diferite, anvelopa semnalului recepționat este descrisă statistic de distribuția Rayleigh dacă nu există componenta în linie directă. Dacă există componenta în linie directă, atunci anvelopa semnalului recepționat este descrisă de o distribuție Rice.

3.5 Diversitate

În contextul comunicațiilor radio, tehnicile de diversitate [4][8][10] sunt folosite în mod obișnuit pentru combaterea fadingului.

3.5.1 Tehnici de diversitate

Diversitatea spațială este exploatată pe legătura ascendentă la receptorul stației de bază. *Diversitate temporală. Diversitate unghiulară.* Din moment ce fasciculele direcționale implică utilizarea aperturii antenei, diversitatea unghiulară este apropiată de diversitatea spațială [11]. *Diversitatea în frecvență. Diversitate multicală. Diversitatea prin polarizare.*

3.5.2 Tehnici de combinare a diversității

Combinarea diversității constă în recepția redundantă a semnalului mesaj pe două sau mai multe canale de fading, apoi se combină aceste replici la receptor pentru a crește RSZ total recepționat.

3.6 Multiplexare spațială

Multiplexarea spațială este o tehnică de transmisie care se folosește în sistemele cu mai multe antene, fără fir, pentru a transmite independent și separat mai multe semnale de date codate, numite fluxuri, de la fiecare dintre antenele de transmisie.

3.7 Sisteme cu mai multe antene

Diversitatea spațială folosește mai multe antene la emisie și la recepție cu mai multe configurații.

3.7.1 Canalul SISO

Se consideră răspunsul la impuls al canalului într-un canal variant în timp $h(\tau, t)$, definit conform (3.15). Când un semnal $s(t)$ este transmis, semnalul recepționat, $y(t)$, este

$$y(t) = h(\tau, t) * s(t) + n(t), \quad (3.37)$$

unde $*$ este produsul de convoluție și $n(t)$ este ZAGA.

3.7.2 Canalul SIMO

Un canal SIMO cu N_r antene de recepție și poate fi descompus în N_r canale SISO. Când un semnal $s(t)$ este transmis, semnalul recepționat la a i -a antenă de recepție

$$y_i(t) = h_i(\tau, t) * s(t) + n_i(t), \quad i = 1, 2, 3, \dots, N_r, \quad (3.39)$$

unde $n_i(t)$ este vectorul ZAGA de dimensiune ($N_r \times 1$).

3.7.3 Canalul MISO

Un canal MISO cu N_t antene de emisie și poate fi descompus în N_t canale SISO. Presupunând $s_j(t)$ semnalul transmis de a j -a antenă de emisie, semnalul recepționat este

$$y(t) = \sum_{j=1}^{N_t} h_j(\tau, t) * s_j(t) + n(t). \quad (3.42)$$

3.7.4 Canalul MIMO

Se consideră un canal MIMO cu N_t antene de emisie, N_r antene de recepție. Presupunând $s_j(t)$ semnalul transmis de a j -a antenă de emisie, semnalul recepționat de a i -a antenă de recepție, este

$$y_j(t) = \sum_{j=1}^{N_t} h_{i,j}(\tau, t) * s_j(t) + n_j(t), \quad i = 1, 2, 3, \dots, N_r. \quad (3.45)$$

3.7.5 Canalul MIMO cu mai mulți utilizatori

MIMO cu mai mulți utilizatori (MU-MIMO) este un termen care definește un sistem în care o legătură MIMO este folosită de mai mulți utilizatori concomitent și care împart o singură resursă în timp-frecvență pentru a exploata diversitatea oferită de existența mai multor utilizatori.

1. Legătura ascendentă a MU-MIMO

Matricea canalului care leagă utilizatorul $u_k, k = 1, 2, \dots, K$ de stația de bază, notată cu H_k , de dimensiune $(N_r \times N_{t_k})$. Semnalul recepționat la stația de bază, y , de dimensiune $(N_r \times 1)$ este

$$y = \sum_{k=1}^K H_k s_k + n, \quad (3.47)$$

unde n este vectorul ZAGA, $(N_r \times 1)$ și $s_k(t)$ este semnalul transmis, $(N_{t_k} \times 1)$.

2. Legătura descendentă a MU-MIMO

Matricea canalului care face legătura dintre utilizatorul $u_k, k = 1, 2, \dots, K$ și stația de bază este notată cu H_k și are dimensiunea $(N_{t_k} \times N_r)$. Pentru fiecare utilizator, vectorul semnalului recepționat de dimensiune $(N_{t_k} \times 1)$, $k = 1, 2, \dots, K$ este dat de relația

$$y_k = H_k \cdot s + n_k, \quad k = 1, 2, \dots, K, \quad (3.49)$$

unde n_k este vectorul ZAGA, $(N_{t_k} \times 1)$ și s este vectorul semnalului transmis, $(N_r \times 1)$.

3.7.6 Canalul MIMO masiv

Tehnica MIMO masiv este cea în care la nivelul stației de bază folosesc câteva sute până la mii de antene, iar utilizatorii mobili folosesc mai puține antene - una sau două antene și are mai multe avantaje, prezentate în continuare. MIMO masiv este un caz special al MU-MIMO.

3.8 Sisteme cooperative

Ideea de cooperare a fost descrisă pentru prima dată în [12], unde se pun bazele canalelor de releu, importante atât pentru rețele cu fir cât și pentru cele fără fir. În rețelele cu fir mai multe perechi de surse și destinații sunt conectate prin intermediul unor noduri de releu. În rețelele fără fir, nodurile inactive recepționează transmisiunile din jur, care pot repeta informația și pot contribui la obținerea unor rate de transmisie mai mari. Procesul de repetare poate fi: *transparent* sau *regenerativ* [2].

3.8.1 Avantajele și dezavantajele cooperării în comunicații fără fir

Avantajele cheie ale folosirii releelelor: câștigul în performanță, calitate echilibrată a serviciilor, implementarea unor sisteme cu infrastructură redusă, costuri reduse. Dezavantaje: planificare complexă, cantitatea suplimentară de informație transmisă, alegerea partenerului, creșterea interferențelor, trafic suplimentar la rețea, latență ridicată, sincronizare strictă, estimări de canal.

3.8.2 Compromisuri pentru performanță

Pentru a obține o performanță cât mai bună, sunt necesare o serie de compromisuri între diverși parametri: acoperire și capacitate, complexitatea legată de algoritmi de procesare și hardware, interferență și performanță, implementare facilă și performanță, cost și performanță.

3.8.3 Tehnici de cooperare

Există o gamă variată de metode prin care se pot utiliza releele într-un sistem de comunicație. Ele pot fi clasificate în aproximativ două grupe:

1. Protocoale de cooperare transparente

Metoda „Amplifică și trimite”. Releele cooperative vor converti semnalul analogic recepționat, îl amplifică și îl trimit mai departe folosind o altă bandă de frecvențe [2]. *Metoda „Procesare liniară și trimite”* include și alte operații liniare simple efectuate asupra semnalului analogic [2]. *Metoda „Procesare neliniară și trimite”* efectuează unele operații neliniare asupra semnalului analogic primit înainte de a fi retransmis [2].

2. Protocoale de cooperare regenerative

Metoda „Comprimă și trimite”. Abordarea aceasta este văzută ca o extensie a AF pentru care semnalul analogic recepționat va fi eșantionat, cuantizat, comprimat și retrimis [2]. *Metoda „Decodează și trimite”* face decodarea semnalului recepționat și recodarea cu un cod diferit înainte de a fi retransmis [2].

Capitolul 4 – Analiza performanțelor unui sistem MIMO masiv în prezența CDMA

4.1 Introducere

Dezvoltarea tehnologică impune o creștere rapidă a datelor transmise de serviciile celulare care implică și necesitatea unor rate de date ridicate și latență redusă. Pentru a îndeplini cerințele utilizatorilor, au fost dezvoltate o serie de tehnici de procesare a datelor, iar în prezenta lucrare de doctorat se abordează un tehnica MIMO masiv și CDMA.

4.2 Accesul multiplu

Există multe metode de realizare a accesului multiplu, însă, în continuare, se va discuta doar despre accesul multiplu cu diviziune în cod cu secvență directă (Direct Sequence CDMA - DS-CDMA.)

4.2.1 Acces multiplu cu diviziune în cod cu secvență directă (DS-CDMA)

DS-CDMA face o împrăștiere a densității spectrale de putere a semnalului folosind o secvență cu o rată de simbol mare care multiplică direct fluxul simbolurilor de informație. Aceasta poate fi extinsă pentru mai mulți utilizatori prin furnizarea de diferite coduri de împrăștiere $d_k(t)$ pentru fiecare utilizator din sistem: se pot folosi codurile Walsh pentru forme de undă de împrăștiere sau secvențele pseudo-aleatoare (Pseudo-Random – PN). Câteva secvențe PN sunt secvența- m

[13][14][15], codurile Gold [16][17][18] și secvențele Kasami [13][17].

4.3 Studiu de caz – Analiza performanțelor unui sistem MIMO masiv în prezența CDMA

În acest subcapitol se vor analiza performanțele unui sistem al cărui canal de comunicație este afectat de fading Rayleigh sau Rice și ZAGA. Rezultatele au fost publicate în articolul [19].

4.3.1 Influența numărului de antene / configurații MIMO asupra performanțelor unui sistem CDMA ce folosește coduri de împrăștiere Walsh și PN în prezența fadingului Rayleigh

În Fig. 4.5 patru utilizatori au aceleași performanțe, s-a presupus un sistem perfect sincronizat și codurile Walsh sunt perfect ortogonale. În Fig. 4.6 sunt prezentate performanțele obținute de codurile PN și sunt mai slabe deoarece nu sunt perfect ortogonale. Din Fig. 4.7 se observă că odată ce numărul antenelor de la recepție crește, rezultatele se îmbunătățesc.

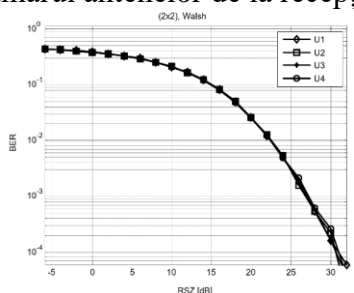


Fig. 4.5 BER versus RSZ pentru BPSK, (2x2) MIMO, coduri de împrăștiere Walsh

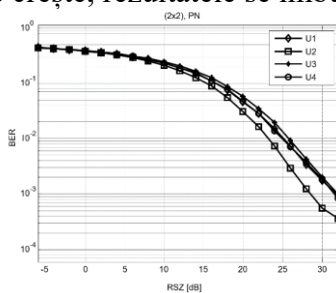


Fig. 4.6 BER versus RSZ pentru BPSK, (2x2) MIMO, coduri de împrăștiere PN

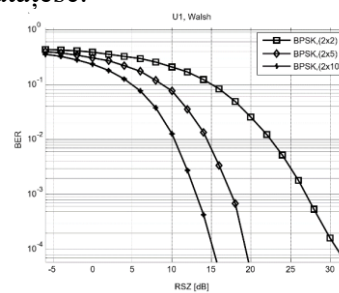


Fig. 4.7 BER versus RSZ pentru BPSK, (2x2), (2x5) și (2x10) MIMO, coduri de împrăștiere Walsh

4.3.2. Influența numărului de antene / configurații MIMO asupra performanțelor unui sistem CDMA ce folosește coduri de împrăștiere Walsh și PN în prezența fadingului Rayleigh când se transmit imagini

În Tabelul 4.4 și Tabelul 4.5 sunt imaginile obținute pentru Walsh și PN, RSZ de 15 dB. S-a comparat imaginea recepționată cu cea inițială, prin MSSIM. Codurile PN nu sunt coduri perfect ortogonale, se găsesc informații de la alți utilizatori în datele primite de fiecare din cei patru utilizatori din cauza interferenței de acces multiplu (MAI).

Tabelul 4.4 Imaginea transmisă de utilizator 1. Coduri Walsh.



MSSIM=0.7555 MSSIM=0.9462 MSSIM=0.9997

Tabelul 4.5 Imaginea transmisă de utilizator 1. Coduri PN.



MSSIM=0.7236 MSSIM=0.9461 MSSIM=0.9974

4.3.3 Influența numărului de antene / configurații MIMO asupra performanțelor unui sistem CDMA ce folosește coduri de împrăștiere Walsh în prezența fadingului Rice

Fig. 4.9 și Fig. 4.10 descriu performanța obținută de unul din utilizatori (ales aleator) atunci când canalul este afectat de fading Rice, (2x2), coduri Walsh. Rezultatele sunt prezentate în [20].

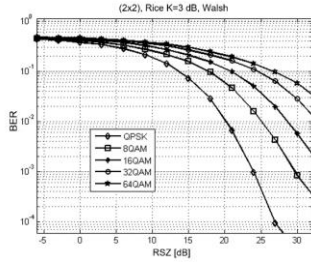


Fig. 4.9 BER versus RSZ pentru QPSK și M-QAM ($M = 8,16,32,64$), (2x2) MIMO, fading Rice, $K = 3$ dB

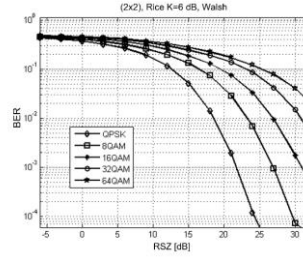


Fig. 4.10 BER versus RSZ pentru QPSK și M-QAM ($M = 8,16,32,64$), (2x2) MIMO, fading Rice, $K = 6$ dB

4.3.4 Influența numărului de antene / configurații MIMO asupra performanțelor unui sistem CDMA ce folosește coduri de împrăștiere PN în prezența fadingului Rice

În aceleași condiții ca mai sus, însă folosind PN, rezultate prezentate în [20], se obține Fig. 4.15, K de 3 dB, (2x2). În cazul codurilor Walsh, K de 6 dB aduce îmbunătățire, însă nu la PN, Fig. 4.16.

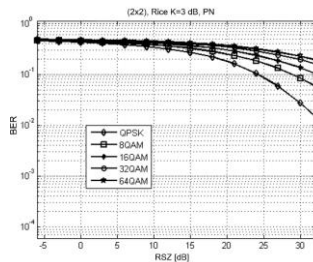


Fig. 4.15 BER versus RSZ, QPSK și M-QAM ($M = 8,16,32,64$), (2x2) MIMO, fading Rice, $K = 3$ dB

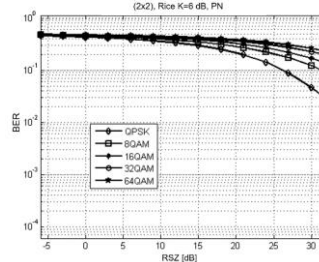










Fig. 4.16 BER versus RSZ, QPSK și M-QAM ($M = 8,16,32,64$), (2x2) MIMO, fading Rice, $K = 6$ dB









4.3.5 Influența numărului de antene / configurații MIMO asupra performanțelor unui sistem CDMA ce folosește coduri de împrăștiere Walsh și PN în prezența fadingului Rice când se transmit imagini

Ca și în subcapitolul 4.3.2, datele aleatoare vor fi înlocuite de imagini digitizate care vor fi transmise de cei patru utilizatori, parte a articolului [20]. În Tabelul 4.11 și în Tabelul 4.12 sunt imaginile obținute pentru configurația (2x2) MIMO, folosind coduri Walsh și PN, RSZ de 20 dB.

Tabelul 4.11 Imaginile recuperate pentru QPSK, coduri Walsh.

| | | | QPSK | | | |
|------------|-------|-------------|---|---|---|---|
| | | | Utilizator 1 | Utilizator 2 | Utilizator 3 | Utilizator 4 |
| $K = 3$ dB | (2x2) | RSZ = 20 dB |  |  |  |  |
| | | MSSM | 0.9591 | 0.9663 | 0.9567 | 0.9524 |
| $K = 6$ dB | (2x2) | RSZ = 20 dB |  |  |  |  |
| | | MSSM | 0.9848 | 0.9871 | 0.9839 | 0.9816 |

Tabelul 4.12 Imaginile recuperate pentru QPSK, coduri PN.

| | | | QPSK | | | |
|---------------|-------|----------------|---|---|--|---|
| | | | Utilizator 1 | Utilizator 2 | Utilizator 3 | Utilizator 4 |
| $K = 3$ dB | (2x2) | RSZ = 20 dB |  |  |  |  |
| | | MSSIM | 0.6171 | 0.7538 | 0.5458 | 0.6453 |
| $K = 6$ dB | (2x2) | RSZ = 20 dB |  |  |  |  |
| | | MSSIM | 0.5546 | 0.4738 | 0.4738 | 0.6054 |

4.4 Concluzii

Scopul acestui capitol a constat în evaluarea performanțelor unui sistem MIMO masiv cu CDMA. S-a demonstrat că odată ce numărul de antene de recepție este mărit, BER este îmbunătățit. Un alt factor care influențează performanța este ordinul de modulație. S-au investigat și performanțele obținute când se transmit imagini în locul datelor aleatoare și se pot trage aceleași concluzii. Codurile de împrăștiere Walsh și PN sunt folosite pentru separarea utilizatorilor, codurile Walsh fiind o alegere mai bună față de PN.

Capitolul 5 - Analiza performanțelor unui sistem MIMO masiv în prezența OFDM și LDPC

5.1 Introducere

În Fig. 5.1 este descris modelul dezvoltat pentru partea de transmisie a datelor, la recepție efectuându-se aceste operații în sens invers, adăugând și un detector cu rolul de a minimiza erorile.

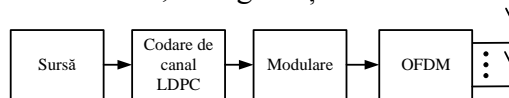


Fig. 5.1 Partea de transmisie a datelor

În cele ce urmează sunt prezentate performanțele unui sistem MIMO masiv, cu LDPC și OFDM.

5.2 Influența numărului de antene / configurații MIMO asupra performanțelor unui sistem ce folosește modulația OFDM și detectoarele MMSE și MMSE-SIC

În acest subcapitol se vor analiza performanțele unui sistem MIMO masiv, pe legătura ascendentă, al cărei canal de comunicație este afectat de fading Rayleigh și ZAGA. Rezultatele sunt publicate în articolul [21].

5.2.1 Performanțele unui sistem MIMO Masiv fără OFDM și cu detector MMSE

În Fig. 5.2 apare performanța pentru diferite modulații, fading Rayleigh, (2x50) MIMO. Dacă ordinul de modulație crește, performanța este mai slabă. Mărind numărul de utilizatori de la 10 la 20, BER este mai mare. În Fig. 5.3 apare BER în funcție de numărul de utilizatori în aceleași condiții ca Fig. 5.2, RSZ de 10 dB.

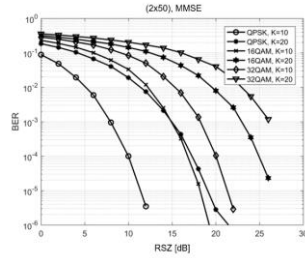


Fig. 5.2 BER versus RSZ pentru o configurație MIMO de (2x50)

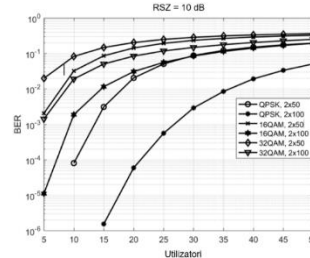


Fig. 5.3 BER versus numărul de utilizatori pentru RSZ=10 dB

5.2.2 Performanțele unui sistem MIMO Masiv cu OFDM cu detector MMSE

Comparând Fig. 5.2 și Fig. 5.4 se poate remarca o creștere a performanței atunci când este implementat OFDM. Fig. 5.5 scoate în evidență acest punct de vedere prin reprezentarea BER în funcție de numărul de utilizatori, în aceleași condiții ca în Fig. 5.3.

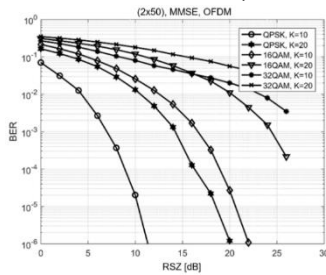


Fig. 5.4 BER versus RSZ într-o configurație MIMO de (2x50), în prezența OFDM

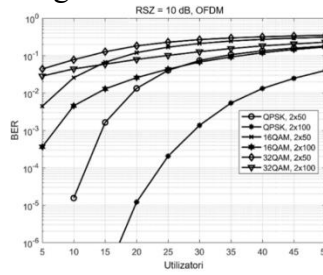


Fig. 5.5 BER versus numărul de utilizatori pentru RSZ = 10 dB, în prezența OFDM

5.2.3 Performanțele unui sistem MIMO Masiv cu OFDM cu detector MMSE-SIC

În Fig. 5.6 sunt rezultatele obținute când stația de bază are 25 de antene, detectoare MMSE și MMSE-SIC. Influența pozitivă a SIC este vizibilă când numărul de utilizatori crește. Rezultatele obținute atunci când se modifică modulația, de la 4-QAM la 16 și 64-QAM sunt date în Fig. 5.7.

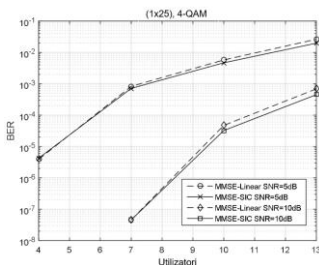


Fig. 5.6 MMSE liniar și MMSE-SIC, RSZ egal cu 5 dB și 10 dB, 4-QAM, stația de bază cu 25 antene în funcție de numărul de utilizatori

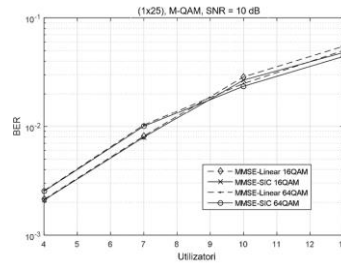


Fig. 5.7 MMSE liniar și MMSE-SIC, RSZ egal cu 10 dB, 16-QAM și 64-QAM, stația de bază cu 25 antene în funcție de numărul de utilizatori

5.3 Influența numărului de antene / configurații MIMO masiv asupra performanțelor unui sistem ce folosește codarea de canal LDPC

Acest subcapitol poate fi văzut ca o continuare a subcapitolului 4.3, aici se introduce și codarea de canal LDPC. Rezultatele sunt publicate în articolul [22].

5.3.1 Performanțele unui sistem MIMO masiv, cu LDPC, cu număr mic de utilizatori

În Fig. 5.11 se face o comparație a performanței obținută cu și fără LDPC, când sunt menținute aceleași condiții de simulare: modulații QPSK și M -QAM ($M = 16,32$), fading Rayleigh, (2×50) , 10 utilizatori. Dacă numărul de antene de la stația de bază este mărit, de la 50 la 100, observațiile generale făcute anterior sunt încă valabile. Această situație este prezentată în Fig. 5.12.

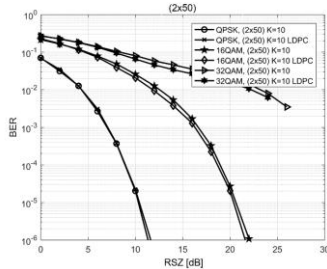


Fig. 5.11 BER versus RSZ cu și fără LDPC pentru 10 utilizatori activi, într-o configurație MIMO de (2×50)

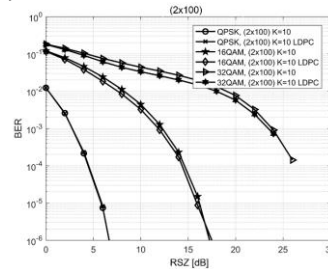


Fig. 5.12 BER versus RSZ cu și fără LDPC pentru 10 utilizatori activi, într-o configurație MIMO de (2×100)

5.3.2 Performanța unui sistem MIMO Masiv, cu LDPC, cu număr mare de utilizatori

Fig. 5.13 descrie rezultatele obținute pentru (2×50) MIMO și performanța este relativ scăzută deoarece numărul de utilizatori fiind mărit de la 10 la 50, rețeaua trebuie să ofere aceleași resurse la aceeași calitate acestor utilizatori. În acest caz beneficiul adus de MIMO, și anume câștigul obținut datorită diversității spațiale, nu mai este suficient. Problema este parțial rezolvată prin creșterea numărului de antene de la 50 la 100, Fig. 5.14.

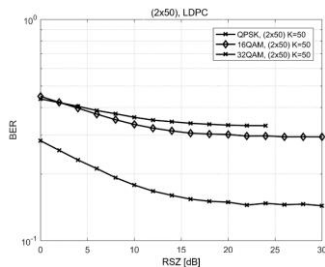


Fig. 5.13 BER versus RSZ cu LDPC pentru 50 utilizatori activi, într-o configurație MIMO de (2×50)

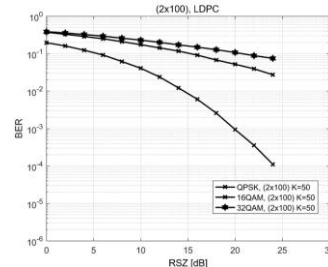


Fig. 5.14 BER versus RSZ cu LDPC pentru 50 utilizatori activi, într-o configurație MIMO de (2×100)

5.4 Concluzii

Dacă se utilizează doar diversitatea spațială oferită de MIMO masiv se constată următoarele: odată cu creșterea ordinului modulației, performanța sistemului se deteriorează. Același lucru se întâmplă și atunci când numărul de utilizatori activi, la un moment dat, pe canal este în creștere. Important este că atunci când numărul de antene de la stația de bază este mărit, performanța devine mai bună. De asemenea, prin introducerea OFDM, s-a observat că performanța își continuă trendul ascendent. Dacă până acum s-a folosit doar detectorul MMSE, s-a optat și pentru implementarea detectorului MMSE-SIC.

Capitolul 6 Analiza performanțelor unui sistem MIMO masiv în prezența LDPC, OFDM și relee

6.1 Introducere

Pentru a îmbunătăți și mai mult performanțele înregistrate de unele sistemele de comunicații, a fost introdusă ideea de comunicare cooperativă, discutată în detaliu în subcapitolul 3.8. Simulările realizate în cele ce urmează abordează un sistem MIMO masiv și încearcă să explice dacă se justifică sau nu costul implementării unui număr mult mai mare de antene la stația de bază.

6.2 Protocolul Amplifică și trimite (AF)

Semnalul recepționat la relee este scalat și semnalul rezultat este transmis la destinație. Operația de scalare este făcută cu ajutorul unui factor de amplificare descris astfel

$$A_k = \sqrt{\frac{P_R}{P|\mathbf{G}_k|^2 + \sigma_{SR,k}^2}}, k = 1, 2, \dots, K, \quad (6.3)$$

unde \mathbf{G}_k este matricea canalului de la sursă la relee pentru utilizatorul k , P_R este puterea de transmisie la relee. Semnalul care pleacă de la relee la destinație poate fi modelat astfel

$$\mathbf{y}_{RD} = \sum_{k=1}^K A_k \mathbf{F}_k \mathbf{y}_{SR,k} + \mathbf{n}_{RD,k}, k = 1, 2, \dots, K \quad (6.4)$$

unde \mathbf{F}_k este matricea canalului de la relee la stația de bază, pentru utilizatorul k și $\mathbf{n}_{RD,k}$ reprezintă ZAGA de la relee la stația de bază, pentru utilizatorul k . La stația de bază vor ajunge două copii ale aceluiași semnal, una direct de la sursă și cealaltă de la relee. Se consideră că cele două copii sunt sincrone. Pentru a combina aceste semnale recepționate se folosește un detector MRC. Cunoscându-se coeficienții canalului, atunci

$$\mathbf{y} = \alpha_1 \mathbf{y}_{SD} + \alpha_2 \mathbf{y}_{RD}, \quad (6.5)$$

unde coeficienții $\alpha_1 = \frac{\sqrt{P} \mathbf{H}_k^*}{\sigma_{SD,k}^2}$ și $\alpha_2 = \frac{\sqrt{P_R} A_k \mathbf{G}_k^* \mathbf{F}_k^*}{A_k |\mathbf{F}_k|^2 \sigma_{RD,k}^2 + \sigma_{RD,k}^2}$, pentru $k=1, 2, \dots, K$.

6.3 Protocolul Decodează și Trimite (DF)

Abordarea este similară protocolului AF, modificarea apare pentru legătura relee – destinație. Prin urmare, aceasta se va rescrie astfel

$$\mathbf{y}_{RD} = \sum_{k=1}^K \sqrt{\widetilde{P}_R} \mathbf{F}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{n}_{RD,k}, k=1, 2, \dots, K \quad (6.9)$$

unde $\widetilde{P}_R = P_R$ dacă la relee se face decodarea corectă a semnalului. La stația de bază vor ajunge tot două copii ale aceluiași semnal și pentru a le combina se folosește tot un detector MRC. Dacă se cunosc coeficienții canalului, ieșirea detectorului MRC urmărește relația prezentată mai sus, în cazul AF, însă $\alpha_1 = \frac{\sqrt{P} \mathbf{H}_k^*}{\sigma_{SD,k}^2}$ și $\alpha_2 = \frac{\sqrt{P_R} \mathbf{F}_k^*}{\sigma_{RD,k}^2}$, pentru $k=1, 2, \dots, K$.

6.4 Influența numărului de antene / configurații MIMO masiv asupra performanțelor unui sistem cu un relee AF și DF între sursă și destinație

În acest subcapitol se vor analiza rezultatele obținute de un sistem MIMO masiv când sunt introduse relee AF sau DF. Rezultatele sunt prezentate în articolul [23]. Fig. 6.2 prezintă rezultatele obținute cu și fără relee AF, cu 10 până la 20 de utilizatori, stația de bază are 10 antene. Se observă că, în ambele situații, implicarea releului aduce plus de eficiență. Crescând numărul de utilizatori

duce la o degradare a rezultatelor. În Fig. 6.3 se poate vedea performanța DF, 20 de utilizatori, unde, pe măsură ce RSZ crește, BER descrește mai rapid decât în situația în care se folosește AF.

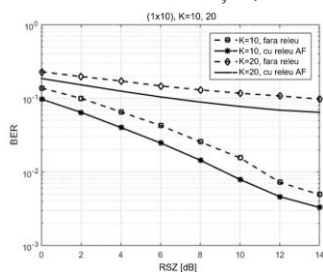


Fig. 6.2 Sistem MIMO Masiv cu mai mulți utilizatori în configurația (1x10) cu și fără releu, protocolul AF

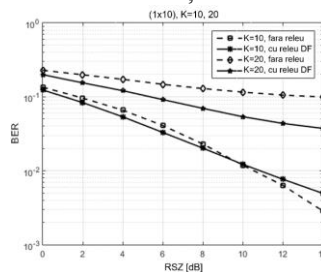


Fig. 6.3 Sistem MIMO Masiv cu mai mulți utilizatori în configurația (1x10) cu și fără releu, protocolul DF

6.5 Influența numărului de antene / configurații MIMO masiv asupra performanțelor unui sistem cu un releu DF între sursă și destinație când terminalul mobil se află sau nu în aria de acoperire a stației de bază

În acest subcapitol vor fi studiate rezultatele obținute de un sistem MIMO masiv, pe legătura ascendentă, atunci când între sursă și destinație sunt introduse relee la care s-au implementat protocolul DF. Au fost luate în discuție două situații: una în care utilizatorii activi sunt în aria de acoperire a stației de bază și cealaltă în care utilizatorii activi sunt în afara ariei de acoperire a stației de bază. Rezultatele sunt prezentate în articolul [24].

6.5.1 Terminalele mobile se află în aria de acoperire a stației de bază

În Fig. 6.6 s-a luat în considerare cazul în care atât stația de bază cât și releul au 10 antene, cu 10, respectiv 20 de utilizatori. Dacă numărul utilizatorilor este egal cu numărul de antene de la stația de bază și releu, prezența releului îmbunătățește calitatea datelor care ajung la stația de bază. Dacă se dublează numărul utilizatorilor, releul nu aduce o îmbunătățire semnificativă pentru că interferența dintre utilizatori este mai mare și detectorul MMSE instalat la releu nu o poate reduce, datele nu pot fi decodate perfect și releul trimite mai departe date cu erori. Dacă numărul de utilizatori activi egal cu 20 și se mărește numărul de antene de la stația de bază la 50, iar numărul de antene de la releu variază între 25 și 100 se obține Fig. 6.7. Atunci când numărul de antene de la releu crește atunci și performanța va fi mai bună.

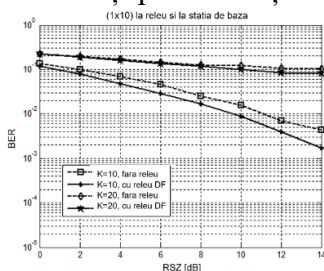


Fig. 6.6 Performanța sistemului atunci când la stația de bază sunt 10 antene și la releu sunt 10 antene, protocol DF

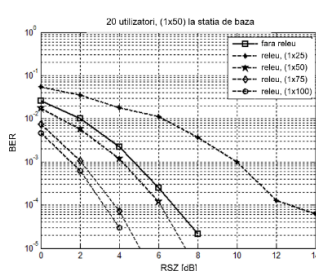


Fig. 6.7 Performanța sistemului atunci când la stația de bază sunt 50 antene și 20 de utilizatori activi, protocol DF

6.5.2 Terminalele mobile se află în afara ariei de acoperire a stației de bază

Pentru Fig. 6.9 trebuie menționat că numărul de antene de la releu variază de la 25 la 50. Când numărul de antene de la stația de bază este 50 și la releu sunt 25 de antene, performanța obținută este similară cu cea în care sunt 25 de antene la stația de bază. Calitatea informației care ajunge la recepție este mai bună atunci când releul este echipat cu un număr mai mare de antene.

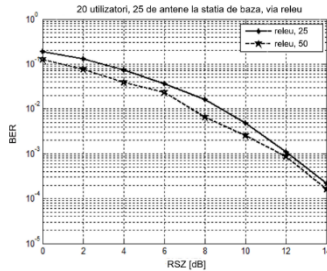


Fig. 6.9 Performanța sistemului atunci când la stația de bază sunt 25 antene și 20 de utilizatori activi, protocol DF

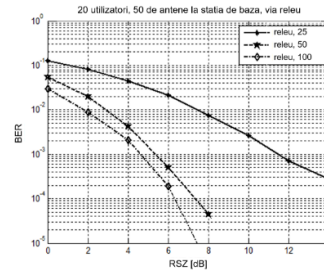


Fig. 6.10 Performanța sistemului atunci când la stația de bază sunt 50 antene și 20 de utilizatori activi, protocol DF

6.6 Influența numărului de antene / configurații MIMO masiv asupra performanțelor unui sistem în prezența OFDM cu un releu AF între sursă și destinație

Pentru a îmbunătăți performanțele obținute, s-a introdus și modulația OFDM și rezultatele se regăsesc în articolul [25]. În Fig. 6.11 sunt prezentate rezultatele obținute de sistem atunci când este folosit de 10, respectiv, 20 de utilizatori, (1x10). Creșterea numărului de utilizatori activi are un efect vizibil asupra performanței generale a sistemului în ambele situații, cu și fără releu. Fig. 6.12 a fost obținută în condiții similare celei anterioare, însă numărul de antene de la recepție este mărit de la 10 la 50. Îmbunătățirea, în această situație, este adusă de diversitatea spațială oferită de MIMO masiv. Avantajul utilizării releelor AF este vizibil când numărul de utilizatori activi crește, în special atunci când RSZ are valori mici.

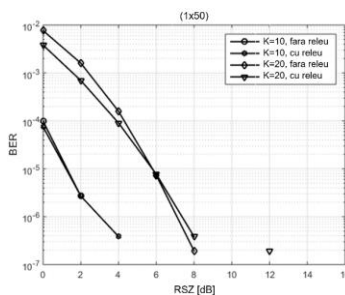


Fig. 6.11 BER versus RSZ în configurația (1x10) cu și fără releu, protocolul AF

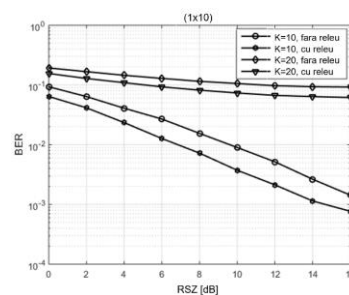


Fig. 6.12 BER versus RSZ în configurația (1x50) cu și fără releu, protocolul AF

6.7 Influența numărului de antene / configurații MIMO masiv asupra performanțelor unui sistem în prezența LDPC, OFDM, cu un releu AF între sursă și destinație și detectoarele MMSE și MMSE-SIC

Pentru a completa un sistem de comunicații digital, sistemului propus anterior i-a fost adăugat și codarea folosind coduri LDPC. Rezultatele sunt publicate în articolul [26]. În Fig. 6.14 se evaluează performanța obținută folosind BPSK, detectorul MMSE-SIC, (1x10), 10 utilizatori și se obțin rezultate mai bune decât atunci când este folosită QPSK. Dacă numărul de utilizatori crește,

atunci resursele sistemului sunt împărțite între aceștia și sunt obținute rezultate mai slabe. Fig. 6.17 prezintă rezultatele obținute de modulația BPSK și Fig. 6.18 cele obținute de modulația QPSK, (1x50). Se poate observa că îmbunătățirea este mai mare odată ce numărul de utilizatori crește.

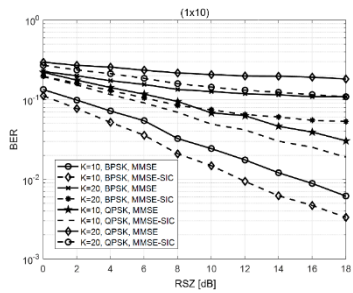


Fig. 6.14 BER versus RSZ, (1x10) MIMO Masiv, cu LDPC, atunci când numărul de utilizatori activi este egal cu 10 și 20

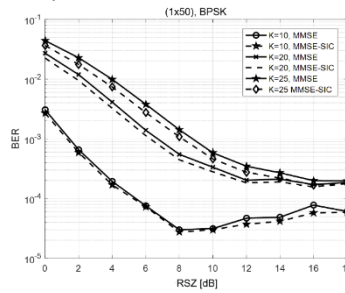


Fig. 6.17 BER versus RSZ într-o configurație (1x50) MIMO Masiv, cu LDPC și modulație BPSK, atunci când numărul de utilizatori activi este egal cu 10, 20, 25

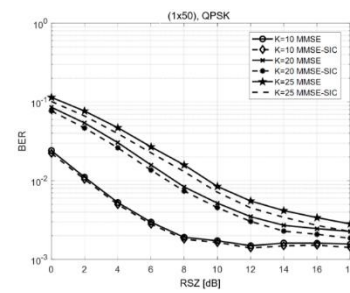


Fig. 6.18 BER versus RSZ într-o configurație (1x50) MIMO Masiv, cu LDPC și modulație QPSK, atunci când numărul de utilizatori activi este egal cu 10, 20, 25

6.8 Concluzii

Scopul acestui capitol a constat în evaluarea performanțelor unui sistem MIMO masiv cu mai mulți utilizatori atunci când între sursă și destinație este implementat un releu. S-a demonstrat că prin folosirea unui releu se poate îmbunătăți performanța, mai ales atunci când numărul de utilizatori activi este apropiat de numărul de antene de la stația de bază. La introducerea modulației OFDM rezultatele au fost și mai bune, costul implementării lor fiind astfel justificat. Mai departe, introducând și codarea LDPC, detectorul MMSE și MMSE-SIC folosite pentru estimarea informației transmise de fiecare utilizator activ în parte și astfel conduc la o îmbunătățire și mai evidentă a calității informației care ajunge la recepție.

Capitolul 7 Accesul multiplu cu acces simultan

Accesul multiplu non-ortogonal (Non-Orthogonal Multiple Access – NOMA) în domeniul cod realizează o multiplexare în domeniul cod a utilizatorilor folosind coduri de împrăștiere unice pentru fiecare utilizator în parte cu densitate redusă și proprietăți de intercorelație reduse. Atât timp cât proprietatea de ortogonalitate nu este respectată, aceste scheme pot oferi posibilitatea utilizatorilor de a-și alege codul de împrăștiere, însă este prezentă interferența dintre utilizatori; prin urmare, cel puțin prin prisma acestor aspecte, aceste scheme pot fi privite ca o involuție prin comparație cu CDMA [27]. Ca exemplu de astfel de schemă putem da MUSA [28].

7.1 MUSA

În MUSA, codurile de împrăștiere scurte, complexe, sunt utilizate datorită gradelor suplimentare de libertate oferite de partea imaginară, prin urmare pot susține un număr mult mai mare de utilizatori care împart același bloc de resurse, realizând practic un proces de superpoziție [30]. În această teză se folosesc coduri de împrăștiere complexe formate din setul $\{-1, -1-i, -1+i, -i, 0, i, 1, 1-i, 1+i\}$. O altă idee ar fi construirea codurilor complexe pornind de la codurile de împrăștiere

PN sau Walsh. Un cod poate fi obținut combinând rândurile matricii ce conțin codurile PN sau Walsh, luând în considerare faptul că un singur rând poate fi folosit o singură dată.

7.2 Influența numărului de antene / configurații MIMO masiv asupra performanțelor unui sistem în prezența LDPC, OFDM, cu un releu DF între sursă și destinație, folosind accesul multiplu MUSA și detectorul MMSE

Performanța obținută de sistemul propus evaluată în acest subcapitol a fost prezentată în articolul de revistă [31]. Tabelul 7.2 sumarizează rezultatele obținute în simulările folosind coduri de împrăștiere Walsh și PN, RSZ de 12 dB, 16 utilizatori, evidențiind că cea mai favorabilă combinație, pentru a avea cea mai bună performanță, este aceea în care sunt 30 de antene la releu.

Tabelul 7.2 BER versus RSZ pentru coduri de împrăștiere Walsh și PN pentru un RSZ=12dB

| | (1x26x30) | (1x30x30) |
|-------|-----------|-----------|
| Walsh | 0.0064606 | 0.00409 |
| PN | 0.01667 | 0.004346 |

În Fig. 7.4 și Fig. 7.5 sunt rezultatele obținute de MUSA și MUSA₀, cu 12 și 16 utilizatori activi. Fig. 7.6 prezintă rezultatele obținute de codurile complexe obținute pornind de la PN.

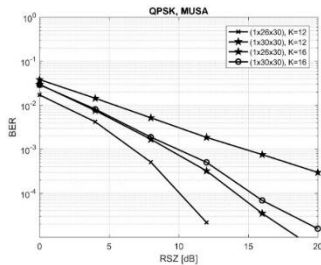


Fig. 7.4 BER versus RSZ pentru configurațiile (1x26x30) și (1x30x30) MIMO Masiv, modulație QPSK, MUSA cu 12,16 utilizatori activi

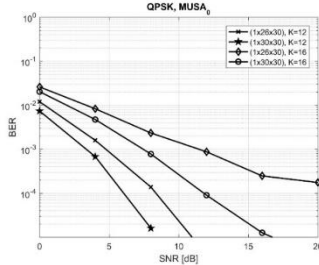


Fig. 7.5 BER versus RSZ pentru configurațiile (1x26x30) și (1x30x30) MIMO Masiv, modulație QPSK, MUSA₀ cu 12,16 utilizatori activi

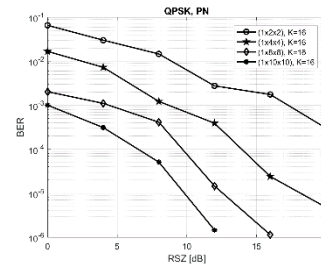


Fig. 7.6 BER versus RSZ pentru configurațiile (1x26x30) și (1x30x30) MIMO Masiv, modulație QPSK, MUSA cu 12,16 utilizatori activi

Se poate ușor vedea că noua combinație de coduri a redus semnificativ valorile pentru BER, îmbunătățirea fiind și mai importantă pe măsură ce RSZ crește.

7.3 Concluzii

Scopul acestui capitol a constat în evaluarea performanțelor unui sistem MIMO Masiv, pe legătura ascendentă, când este implementat un releu DF, folosind codarea de canal LDPC și modulația OFDM atunci când utilizatorii sunt separați folosind coduri de împrăștiere complexe de la patru seturi diferite de coduri MUSA, MUSA₀, EMUSA și EMUSA₀. Performanța noilor seturi de coduri este evidențiată prin compararea cu codurile de împrăștiere clasice Walsh și PN, acestea din urmă fiind surclasate. S-a analizat și situația în care numărul de antene de recepție de la releu este diferit față de numărul de antene de recepție de la destinație și unele discuții au fost făcute legate de compromisul care trebuie făcut între complexitatea de procesare, rata totală și lărgimea de bandă ocupată și nivelul de performanță cerut. O nouă abordare, descrisă și testată în prezenta teză, este cea în care codurile de împrăștiere complexe sunt obținute pornind de la Walsh și PN. Rezultatele obținute sunt promițătoare și sunt în legătură directă cu lungimea codului folosit.

Capitolul 8 Concluzii

Scopul acestei teze de doctorat a fost analiza performanțelor înregistrate de un sistem de comunicație atunci când sunt implementate o serie de tehnologii pentru a preîntâmpina posibilități factori care pot deteriora calitatea informației care ajunge la recepție.

8.1 Rezultate obținute

În *Capitolul 2* s-a făcut o prezentare teoretică a trei tehnici de modulație, apoi a OFDM combinată cu BPSK și QPSK. În *Capitolul 3* au fost amintite elementele care influențează calitatea semnalului transmis. Tot aici s-a prezentat tehnologia MIMO și principiul cooperării. În următorul capitol, s-a simulat, în Matlab, comportamentul tehnologiilor prezentate în capitolele 2 și 3, când un șir de biți aleator modulat trece printr-un canal afectat de fading Rayleigh și Rice. În plus, autorul a înlocuit acest șir de biți aleator cu imagini alb-negru. *Capitolul 5* studiază comportamentul codurilor LDPC într-un sistem MIMO masiv, folosind Matlab. La recepție, estimarea informației transmise se face folosind detectoarele MMSE și MMSE-SIC. În *Capitolul 6* s-a făcut o introducere teoretică a AF și DF, când sistemul a fost utilizat de mai mulți utilizatori simultan. *Capitolul 7* a început cu o prezentare teoretică a MUSA. S-au testat performanțele acesteia, prin comparație cu CDMA, când s-a variat numărul de antene de la recepție pentru releu, numărul de utilizatori și lungimea codului de împrăștiere utilizat. Mai mult, autorul a prezentat și o modalitate de obținere a codurilor de împrăștiere complexe pornind de la codurile de împrăștiere PN.

8.2 Contribuții originale

Cercetarea științifică efectuată pe durata tezei de doctorat și prezentată pe parcursul acestei lucrări aduce în prim plan următoarele contribuții originale:

1. Implementarea, în mediul de simulare Matlab, a unui sistem cu 4 utilizatori și acces multiplu CDMA (codurile de împrăștiere Walsh și PN) care transmite, în primă fază, date aleatoare și apoi fiind înlocuite cu imagini în tonuri de gri. Evaluarea performanțelor se face cu ajutorul BER versus RSZ și a indexului MSSIM. Canalul de comunicație este afectat de fading Rayleigh.
2. Se repetă simulările de la 3, însă canalul de comunicație este afectat de fading Rice, luând în discuție diverse valori pentru factorul Rice.
3. Implementarea, în mediul de simulare Matlab, a unui sistem cu număr ridicat de utilizatori și un număr ridicat de antene de recepție. Evaluarea performanțelor cu ajutorul BER versus RSZ, în lipsa OFDM și în prezența OFDM variind numărul utilizatorilor și numărul antenelor la recepție. Canalul de comunicație este afectat de fading Rayleigh.
4. Evaluarea performanțelor unui sistem MIMO Masiv în absența și în prezența OFDM, folosind detectoarele MMSE și MMSE-SIC.
5. Evaluarea performanțelor unui sistem MIMO Masiv în prezența LDPC, folosind detectorul MMSE atunci când în rețea există un număr mai mic sau mai mic de utilizatori activi.
6. Evaluarea performanțelor unui sistem MIMO Masiv atunci când între sursă și destinație s-a introdus un releu care folosește fie protocolul AF, fie DF. La destinație s-a folosit detectorul MMSE.
7. Evaluarea performanțelor unui sistem MIMO Masiv atunci când între sursă și destinație s-a introdus un releu care folosește protocolul DF când utilizatorul se află sau nu în aria de

acoperire a stației de bază. Configurația antenelor de la stația de bază și de la releu este diferită.

8. Evaluarea performanțelor unui sistem MIMO Masiv atunci când între sursă și destinație s-a introdus un releu care folosește protocolul AF, în prezența OFDM.
9. Evaluarea performanțelor unui sistem MIMO Masiv atunci când între sursă și destinație s-a introdus un releu care folosește protocolul AF în prezența LDPC, OFDM, detectoarele MMSE și MMSE-SIC.
10. Analiza teoretică a codurilor de împrăștiere complexe și a tehnicii de acces multiplu care le utilizează, și anume MUSA.
11. Propunerea unei noi metode de obținere a codurilor de împrăștiere complexe, pornind de la codurile de împrăștiere PN și Walsh.
12. Evaluarea performanțelor unui sistem MIMO Masiv atunci când se folosesc coduri de împrăștiere complexe versus coduri Walsh și PN.

8.3 Lista lucrărilor publicate

Cercetarea științifică efectuată pe durata tezei de doctorat cuprinde un număr de 17 lucrări științifice publicate la conferințe internaționale de specialitate sau jurnale. Lucrările științifice care au fost publicate în vederea susținerii scopului tezei sunt următoarele:

1. **M. Berceanu**, C. Voicu și S. Halunga, „Performance analysis of a large MIMO-CDMA system when image transmission is involved,” *2016 International Conference on Communications (COMM)*, 9-10 June 2016, DOI: 10.1109/ICComm.2016.7528257 (**ISI, IEEE**).
2. **M.-G. Berceanu**, C. Voicu și S. Halunga, „The analysis of MAI in large scale MIMO-CDMA system,” *Proc. SPIE 10010, Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies VIII (ATOM-N)*, 1001027, 25-28 August 2016, Constanța, DOI:10.1117/12.2243177 (**ISI**).
3. **M. Berceanu**, C. Voicu și S. Halunga, “Performance Analysis of an Uplink Massive MU-MIMO OFDM-Based System,” *2018 International Conference on Communications (COMM)*, București, 2018, pp. 335-9, doi: 10.1109/ICComm.2018.8484273 (**ISI, IEEE**).
4. **M.-G. Berceanu**, C. Voicu, și S. Halunga „Uplink massive MU-MIMO OFDM-based system with LDPC coding-simulation and performances,” *Proc. SPIE 10977, Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies IX (ATOM-N)*, 109770V, Constanța (**ISI**).
5. C. Voicu, **M.-G. Berceanu** și S. Halunga „The use of relays in uplink MU Massive-MIMO system”, *Proc. SPIE 10977, Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies IX (ATOM-N)*, Constanța, 1097722 (**ISI**).
6. **M. Berceanu**, C. Voicu și S. Halunga, „AF Relaying in a Massive Mu-Mimo Ofdm System,” *2018 IEEE 24th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, Iași, 2018, pp. 226-229. doi: 10.1109/SIITME.2018.8599268 (**ISI, IEEE**).
7. C. Voicu, **M. Berceanu** și S. Halunga, „Non-Transparent Relays in a Large Scale MIMO System,” *2018 26th Telecommunications Forum (TELFOR)*, Belgrad, Serbia, 2018, pp. 1-4. doi: 10.1109/TELFOR.2018.8612116 (**ISI, IEEE**)

8. **M. Berceanu**, C. Voicu și S. Halunga, „The performance of an uplink Large Scale MIMO system with MMSE-SIC detector,” *2019 International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS)*, Budva, Montenegro, 2019, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICMCIS.2019.8842666 (**IEEE**).
9. **M. Berceanu**, C. Voicu și S. Halunga, „The performance of an uplink Massive MIMO OFDM-based multiuser system with LDPC coding when using relays,” *2019 IEEE 25th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, Cluj-Napoca, 2019, pp. 339-342, doi: 10.1109/SIITME47687.2019.8990723 (**ISI; IEEE**).
10. A. Badea, S. Halunga, **M. Berceanu**, M. Găină, Cristian Capotă și E. Stancu, „Influence of Manchester encoding over spreading codes used in multiple access techniques for IoT purposes,” *2019 IEEE 25th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, Cluj-Napoca, 2019 pp. 216-219, doi: 10.1109/SIITME47687.2019.8990780 (*Proc. SPIE*).
11. A. Badea, **M.-G. Berceanu**, C. Florea și S. Halunga, „The performance of Manchester source coding in an uplink LDPC channel coding OFDM-based Massive MIMO system,” *10th edition of the International Conference Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics and Nanotechnologies (ATOM-N)*, 20 -23 august 2020, Constanța, articol prezentat
12. C. Florea, **M. Berceanu** și S. Halunga, „OFDM in downlink MASSIVE-MIMO system,” *10th edition of the International Conference Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics and Nanotechnologies (ATOM-N)*, 20 - 23 august 2020, Constanța, articol prezentat
13. **M.-G. Berceanu**, C. Florea și S. Halunga, „Performance of Massive MIMO system with orthogonal and non-orthogonal multiple access for uplink in 5G systems”, *Appl. Sci.* 2020, 10(20), 7139; <https://doi.org/10.3390/app10207139> (**Q2, IF: 2.474, ISSN: 2076-3417**).

8.4 Perspective de dezvoltare ulterioară

Se va continua cercetarea cu MIMO masiv și MUSA, când se transmite o secvență de biți aleatoare în absența/prezența unui releu. În plus, doresc să analizez performanțele atunci când obțin codurile complexe de împrăștiere pornind de la PN și Walsh. O altă direcție de dezvoltare o reprezintă analiza situației când este introdusă codarea Manchester, pentru care am început cercetarea în [32] și [33]. Doresc să analizez, mai departe, situația în care secvența de biți aleatoare este înlocuită cu imagini PNG alb-negru, folosind coduri Walsh și PN. Imaginile PNG alb-negru vor fi ulterior înlocuite cu imagini color (JPEG) și video (MPEG). O altă direcție de dezvoltare este aceea de a implementa un număr mai mare de releu și de a compara performanțele obținute cu situația în care se folosește doar un singur releu. Următorul pas este implementarea unui algoritm de selecție a releului optim în funcție de distanța față de destinație și de putere. Dacă până acum a fost analizată doar legătura ascendentă, o altă direcție de dezvoltare o reprezintă analiza pentru legătura descendentă, pentru care am început cercetarea în [34].

Bibliografie selectivă

- [1] M. Ergen, *Mobile Broadband - including WiMAX and LTE*, Springer-Verlag US, 2009.

- [2] D. Mischa și L. Yonghui, *Cooperative Communications: Hardware, Channel & PHY*, John Wiley and Sons, Ltd., 2010.
- [3] M. Dohler, *Virtual Antenna Arrays*, London: Ph.D thesis, 2003.
- [4] T. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, Prentice Hall, 2001.
- [5] J. S. Hamidreza și T. Le-Ngoc, *Coded-Modulation Techniques for Fading Channels*, Springer US, 1994.
- [6] A. Grami, *Introduction to Digital Communications*, Academic Press, 2015.
- [7] D. Tse și P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*, New York: Cambridge University Press, 2005.
- [8] G. L. Stuber, *Principles of Mobile Communication*, 2nd edition, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [9] Y. S. Cho, J. Kim, W. Y. Yang și C. G. Kang, *MIMO-OFDM wireless communications with Matlab*, 2010: John Wiley & Sons, Ltd..
- [10] W. C. Jakes, *Microwave Mobile Communication*, 2nd ed., NJ: IEEE Press, 1994.
- [11] W. Lee, *Mobile Communications Engineering*, New York: McGraw-Hill, 1982.
- [12] E. v. d. Meulen, „Three-terminal communication channels,” *Advances in Applied Probability*, vol. 3, pp. 120-154, 1971.
- [13] M. B. Pursley și D. V. Sarwate, „Crosscorrelation properties of pseudorandom and related sequences,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 68, p. 593–619, 1980.
- [14] L. T. Wang și E. J. McCluskey, „Linear feedback shift register design using cyclic codes,” *IEEE Transactions on Computers*, vol. 37, nr. 10, pp. 1302-1306, 1988.
- [15] A. Fuster și L. J. Garcia, „An efficient algorithm to generate binary sequences for cryptographic purposes,” *Theoretical Computer Science*, vol. 259, nr. 1-2, pp. 679-688, 2001.
- [16] B. Sklar, *Digital Communications: Fundamentals and Applications (2nd Edition)*, Prentice Hall, 2001.
- [17] R. Gold, „Optimum binary sequences for spread spectrum multiplexing,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 13, nr. 4, p. 619–621, 1967.
- [18] E. H. Dinan și B. Jabbari, „Spreading codes for direct sequence CDMA and wideband CDMA cellular networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 36, nr. 4, pp. 48-54, 1998.
- [19] M. Berceanu, C. Voicu și S. Halunga, „Performance analysis of a large MIMO-CDMA system when image transmission is involved,” în *2016 International Conference on Communications (COMM)*, Bucharest, 9-10 June 2016.
- [20] M.-G. Berceanu, C. Voicu și S. Halunga, „The analysis of MAI in large scale MIMO-CDMA system,” în *Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies VIII*, Constanta, 25-28 August 2016.
- [21] M. Berceanu, C. Voicu și S. Halunga, „The performance of an uplink Large Scale MIMO system with MMSE-SIC detector,” în *2019 International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS)*, Budva, Montenegro, 2019.

- [22] M.-G. Berceanu, C. Voicu și S. Halunga, „Uplink massive MU-MIMO OFDM-based system with LDPC coding-simulation and performances,” în *Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies IX*, Constanta, 2018.
- [23] C. Voicu, M.-G. Berceanu și S. Halunga, „The use of relays in uplink MU Massive-MIMO system,” în *Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies IX*, Constanta, 2018.
- [24] C. Voicu, M. Berceanu și S. Halunga, „Non-Transparent Relays in a Large Scale MIMO System,” în *2018 26th Telecommunications Forum (TELFOR)*, Belgrade, 2018.
- [25] M. Berceanu, C. Voicu și S. Halunga, „AF Relaying in a Massive MU-MIMO OFDM System,” în *2018 IEEE 24th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, Iasi, 2018.
- [26] M. Berceanu, C. Voicu și S. Halunga, „The performance of an uplink Massive MIMO OFDM-based multiuser system with LDPC coding when using relays,” în *2019 IEEE 25th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, Cluj-Napoca, 2019.
- [27] M. T. P. Le, G. C. Ferrante, T. Q. S. Quek și M. D. Benedetto, „Fundamental Limits of Low-Density Spreading NOMA With Fading,” *IEEE Transactions on Wireless Communication*, vol. 17, nr. 7, pp. 4648-4659, July 2018.
- [28] 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.
- [30] 3GPP și RP-160279, „Motivation of Uplink Non-orthogonal Transmission for Massive MTC,” ZTE.
- [31] M.-G. Berceanu, C. Florea și S. Halunga, „Performance of Massive MIMO system with orthogonal and non-orthogonal multiple access for uplink in 5G systems”, *Appl. Sci.* 2020, 10(20), 7139; <https://doi.org/10.3390/app10207139> (Q2, IF: 2.474, ISSN: 2076-3417).
- [32] A. Badea, S. Halunga, M. Berceanu, M. Găină, Cristian Capotă și E. Stancu, "Influence of Manchester encoding over spreading codes used in multiple access techniques for IoT purposes," *2019 IEEE 25th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, Cluj-Napoca, 2019 pp. 216-219, doi: 10.1109/SIITME47687.2019.8990780.
- [33] A. Badea, M.-G. Berceanu, C. Florea și S. Halunga, „The performance of Manchester source coding in an uplink LDPC channel coding OFDM-based Massive MIMO system,” *10th edition of the International Conference Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics and Nanotechnologies (ATOM-N)*, 20 -23 august 2020, Constanța, articol prezentat
- [34] C. Florea, M. Berceanu și S. Halunga, „OFDM in downlink MASSIVE-MIMO system,” *10th edition of the International Conference Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics and Nanotechnologies (ATOM-N)*, 20 - 23 august 2020, Constanța, articol prezentat