

**PERFORMANCE OPTIMIZATION FOR 5G WIRELESS COMMUNICATION
SYSTEMS (ORIGINAL)**
**OPTIMIZAREA PERFORMANTELOR SISTEMELOR DE COMUNICATII 5G
(TRADUCERE)**

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnica Timișoara

în domeniul de doctorat inginerie electronică, telecomunicații și tehnologii informaționale

autor ing. Gordana-Raluca BARB

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Marius OTESTEANU

luna iunie anul 2021

Această teză de doctorat este structurată în 8 capitole. Capitolul 1 prezintă o introducere a evoluției sistemelor de comunicații mobile; Capitolul 2 introduce viitoarea generație mobilă, 5G; în Capitolul 3, se discută modelarea canalelor pentru sistemele 5G; în Capitolul 4, ne concentrăm asupra tehnicilor digitale de beamforming pentru 5G; Capitolul 5 se concentrează pe numerologia multiplă pentru 5G; în Capitolul 6, introducem conceptul de partajare dinamică a spectrului în rețelele 4G/5G; Capitolul 7 prezintă concluziile și contribuțiile; în ultimul rând, Capitolul 8 prezintă anexele cu detalii privind simulatorul folosit.

1. Introducere

Acest capitol a început cu prezentarea evoluției sistemelor de comunicații mobile, oferind o imagine de ansamblu asupra tuturor generațiilor mobile anterioare și actuale. Acest lucru a permis o înțelegere mai aprofundată a istoriei și a creșterii observate în domeniul comunicațiilor mobile. În continuare, au fost prezentate obiectivele și motivațiile acestei teze. A fost descrisă structura tezei și, în cele din urmă, au fost descrise contribuțiile cercetării.

2. A 5-a Generație de Sisteme de Comunicații Mobile

5G New Radio (NR) este viitoarea generație de sisteme de comunicații mobile care a început să fie comercializată de la sfârșitul anului 2020 [1]. Spre deosebire de generațiile anterioare, 5G va revoluționa societatea noastră, iar așteptările sunt extrem de mari. Se așteaptă ca 5G să fie însoțit de schimbări masive, să interconecteze miliarde de utilizatori și dispozitive și să permită rate de transfer de date extrem de ridicate [2].

Există 3 use case-uri principale definite pentru următoarea generație de comunicații mobile, cum se poate observa în figura 1[3][4]:

- Extreme Mobile Broadband: oferă experiență îmbunătățită utilizatorului final și rate de transfer de date extrem de ridicate;
- Critical Machine Communication: oferind ultra-fiabilitate și disponibilitate pentru misiuni critice și permițând controlul de la distanță asupra mașinilor/roboților;
- Massive Machine Communication: conectarea a miliarde de obiecte, dispozitive și senzori.

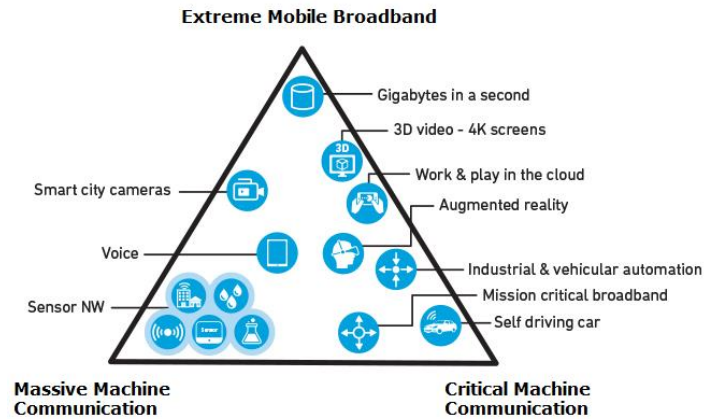


Figura 1: 5G use case-uri potențiale [5].

3. Modelarea Canalelor pentru Sistemele 5G

Modelarea canalelor constituie un parametru important atunci când se dezvoltă un sistem de comunicații 5G și este necesară pentru a oferi acuratețe și a fi intuitivă, bazându-se în același timp pe modul în care sistemul s-ar comporta într-un scenariu de mediu din viața reală. Acestea sunt caracteristici importante, deoarece canalele selectate care sunt utilizate pentru studierea și efectuarea simulărilor sunt fundamentale pentru proiectarea sistemelor de rețele 5G. Prin urmare, noi modele de canale sunt cercetate pentru a putea fi utilizate în simulările pentru analiza sistemelor 5G. 3GPP a lansat un raport de specificații tehnice pentru Release 14 - TR. 138.901 - cu studiul modelelor de canale pentru frecvențe de la 0.5 până la 100 GHz destinate tehnologiei 5G [6]. Scopul este de a ajuta la modelarea și evaluarea tehnicilor la nivelul fizic în timp ce se utilizează modele de canale adecvate. În mod specific, pentru simulările de link-level, raportul de specificații tehnice prezintă două modele principale de canale: Tapped Delay Line (TDL) și Clustered Delay Line (CDL). Fiecare canal are 5 variații principale: A, B și C pentru mediile Non Line of Sight (NLOS) și D și E pentru mediile Line of Sight (LOS) [7]-[9].

Inițial, am evaluat performanța unui sistem 5G MIMO cu un singur utilizator pe downlink, utilizând modelul de canal TDL folosind diferite scheme de modulație. Am studiat cele trei profiluri ale canalului TDL care sunt destinate mediilor NLOS (TDL_A, TDL_B și TDL_C). Parametrii luați în considerare au fost BER și debit pentru un interval selectat de raport semnal-zgomot-plus-interferență (SNIR).

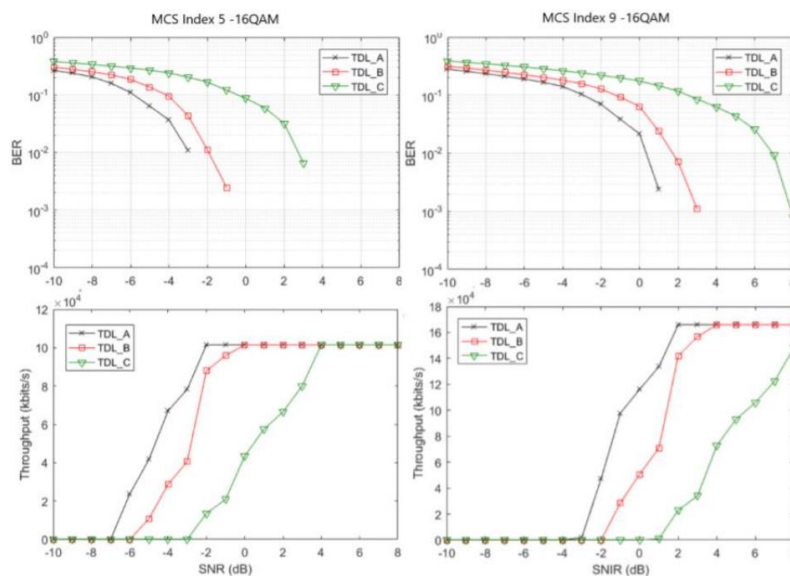


Figura 2: Rezultate de BER si debit folosind modulația 16QAM.

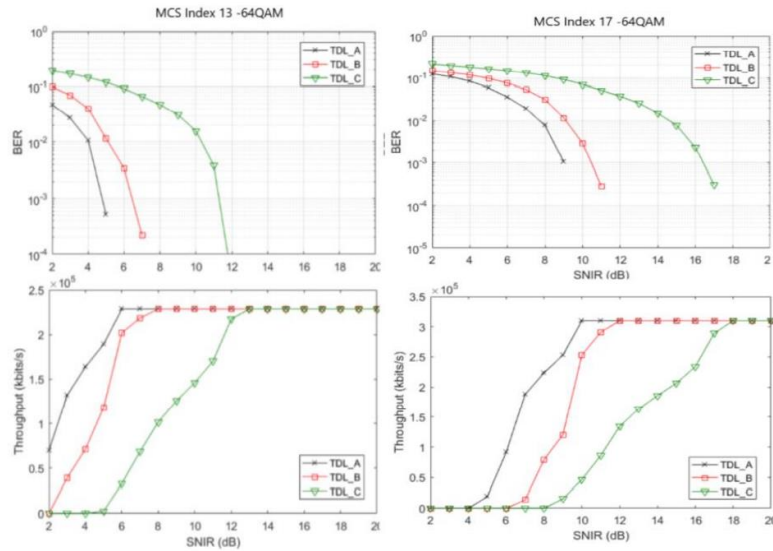


Figura 3: Rezultate de BER si debit folosind modulația 64QAM.

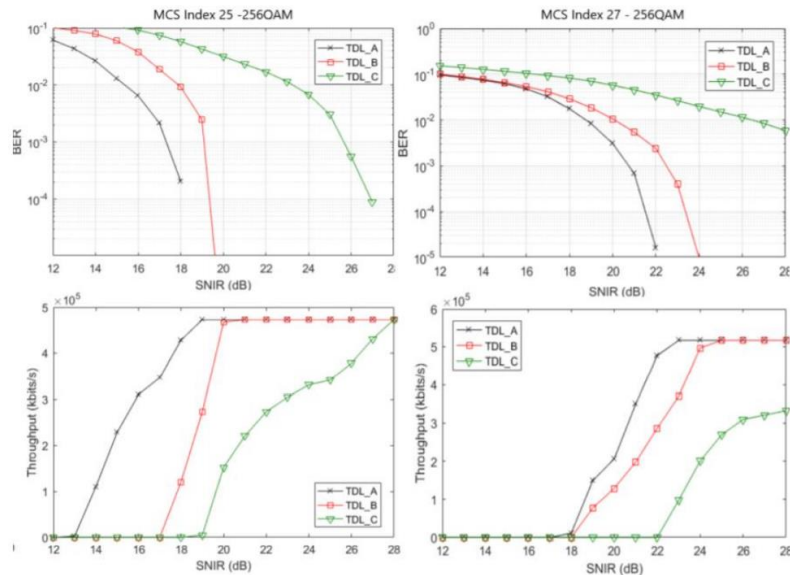


Figura 4: Rezultate de BER si debit folosind modulația 256QAM.

Rezultatele obținute în figurile 2-4 prin simulările efectuate au arătat că cel mai performant canal a fost TDL_A, urmat de TDL_B și în cele din urmă TDL_C. În plus, am obținut valorile de debit maxime și SNIR necesar pentru a le obține pentru fiecare caz. Rezultatele obținute aduc o mare valoare în proiectarea și optimizarea noilor modele de canale pentru sistemele 5G. În continuare, am efectuat un studiu asupra influenței delay spread-ului (DS) în canalele TDL și CDL. Pentru a evalua influența parametrului DS, am efectuat simulări în diferite scenarii de mediu, cum ar fi indoor office, rural macro cell, urban micro cell street canyon și urban macro cell, fiecare cu valori DS diferite.

Am analizat că atât pentru canalele TDL, cât și pentru canalele CDL, profilurile NLOS au avut o performanță globală mai bună, în ceea ce privește debitul și BER, decât profilurile LOS. În plus, am obținut valori pentru debitul maxim și valorile SNIR asociate acestuia. Pentru CDL_A, am observat că sistemul a avut o performanță optimizată cu mediul urban micro cell street canyon în comparație cu scenariul urban macro cell, care are valori de DS mai mari. Am ajuns la concluzia că, pentru a optimiza performanța sistemului 5G, se recomandă utilizarea valorilor de DS scurte (18 și 32 ns) atunci când se adoptă canalul TDL_E. Dacă selectăm canalul

CDL_A, este recomandat să se folosească un DS de 47 ns, a se vedea figurile 5 și 6.

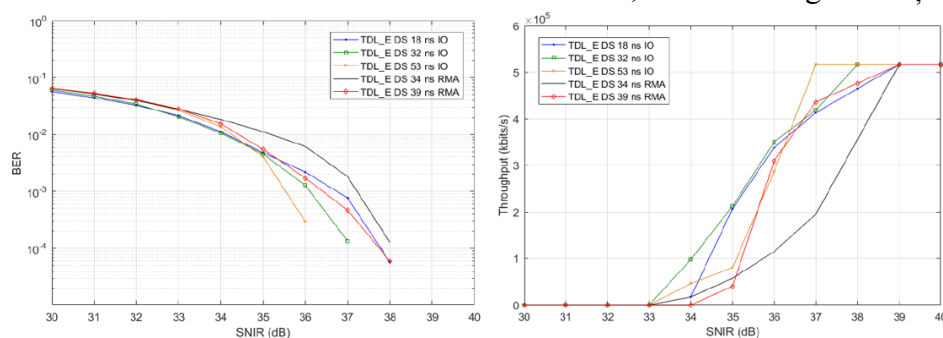


Figura 5: Rezultate de BER și debit pentru profilul TDL_E într-un scenariu de indoor office utilizând un DS de 18,32,53 ns și într-un scenariu rural macro cell utilizând un DS de 34,39 ns.

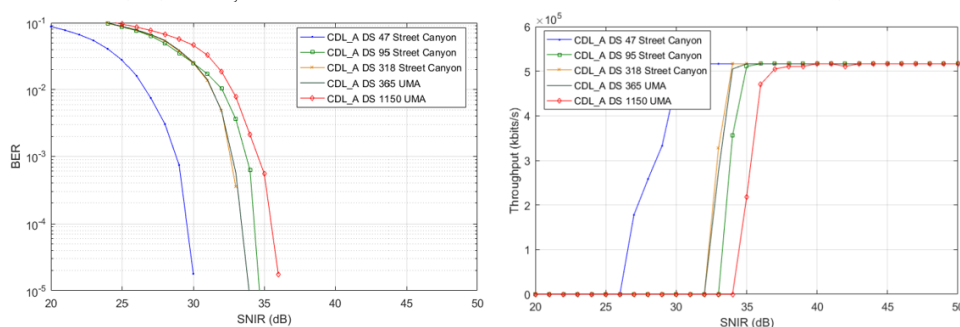


Figura 6: Rezultate de BER și debit pentru profilul CDL_A într-un scenariu street canyon folosind un DS de 47,95,318 ns și într-un scenariu urban macro cell utilizând un DS de 365,1150 ns.

4. Tehnici Digitale de Beamforming pentru 5G

Beamforming este o tehnologie care este privită ca un factor cheie care poate fi utilizat în simultan cu massive MIMO pentru a atinge cerințele țintă propuse pentru următoarele sisteme de comunicații mobile. Tehnologia de beamforming este utilizată pentru a transmite și primi semnale direcționale. Se definește prin schimbarea fazei și amplitudinii fascicului emis pentru a-l direcționa către o direcție specifică, în loc să emită semnalul în toate direcțiile. Există trei tipuri de beamforming: analogic, digital și hibrid [10].

Acest capitol a abordat utilizarea beamforming-ului în sistemele de comunicații 5G. Au fost investigate două tehnici diferite de beamforming digital: Grid of Beams (GoB) beamforming [11][12] și Eigen Based Beamforming (EBB) [13]. O comparație între performanța unui sistem de comunicații 5G utilizând aceste tehnici a fost efectuată [14], a se vedea figura 7.

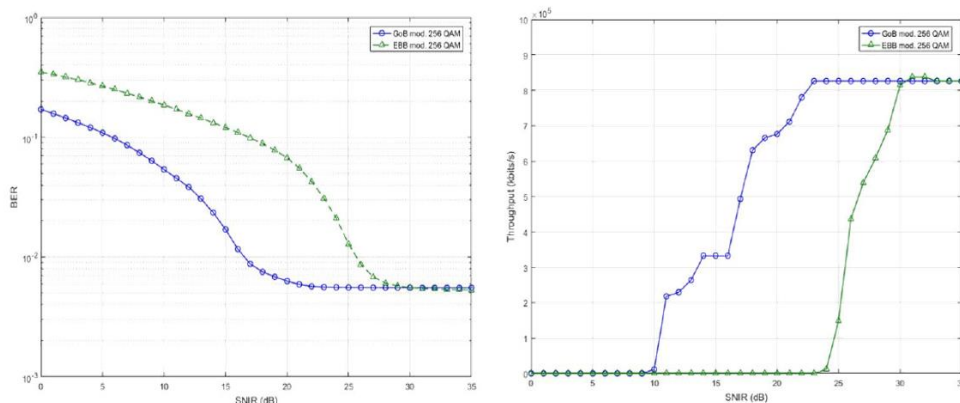


Figura 7: Rezultate de BER și debit pentru modulația 256QAM..

Rezultatele simulării au arătat că tehnica GoB a avut o rată BER mai mică decât EBB și chiar a atins valoarea BER minimă mai devreme decât EBB, stabilizându-se la un SNIR de 15 dB în timp ce EBB a avut nevoie de 24 dB. Au fost obținute valorile maxime ale debitului pentru fiecare tehnică. Am observat că GoB a atins valorile maxime cu 7 dB de SNIR mai devreme decât EBB, din care am ajuns la concluzia că utilizarea tehnicii GoB a condus la o performanță optimizată a sistemului 5G NR, atât din punct de vedere al BER, cât și al debitului, comparativ cu utilizarea de EBB.

5. Numerologia Multiplă pentru Sistemele de Comunicații 5G

O caracteristică majoră a sistemelor de comunicații 5G este capacitatea de a susține numerologii diferite și scalabile [15]. Definiția numerologiei, așa cum este descrisă de 3GPP, se bazează pe un set de parametri necesari la configurarea unei forme de undă, din care este construit un Subcarrier Spacing (SCS) în domeniul frecvenței [16]. SCS-ul este condiționat de valoarea a CP și de lungimea simbolului în cadrul structurii OFDM [17][18]. Acest capitol a studiat noile numerologii multiple OFDM propuse de 3GPP pentru sistemele 5G. O analiză a performanței unui sistem de comunicații 5G, în termeni de BER și de debit, a fost realizată la utilizarea diferitelor numerologii propuse pentru următoarea generație mobilă.

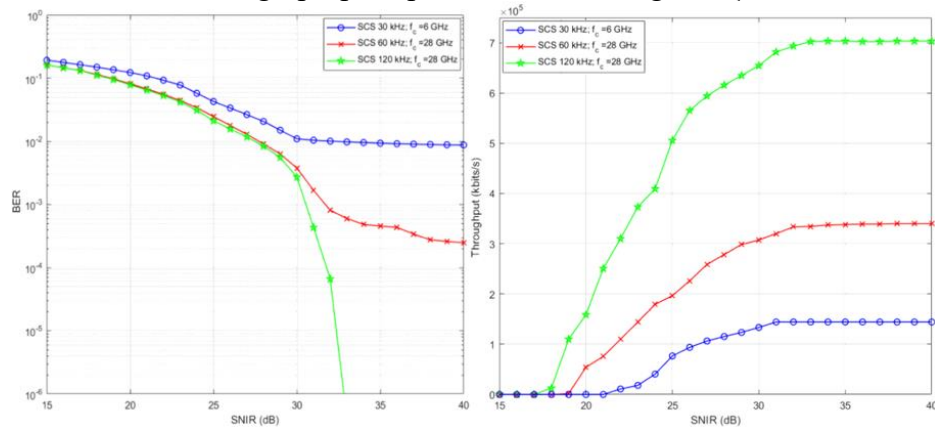


Figura 8: Rezultate de BER si debit într-un mediu indoor office.

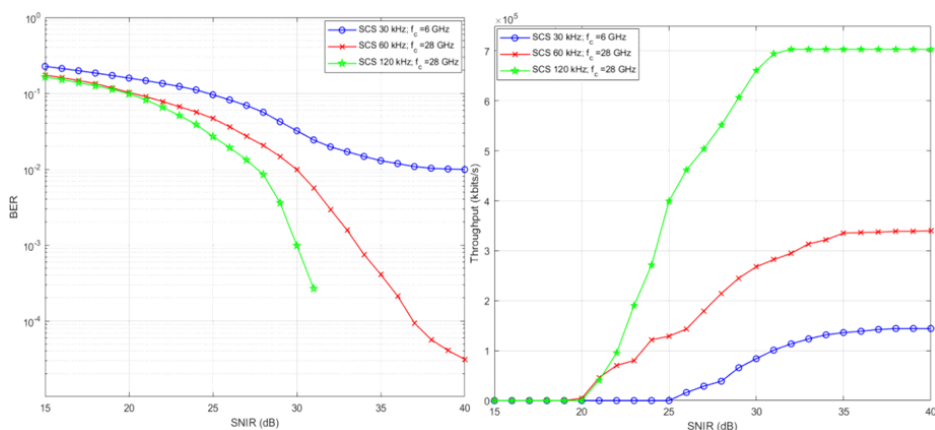


Figura 9: Rezultate de BER si debit într-un mediu street canyon.

Din rezultatele obținute din figurile 8 și 9, am ajuns la concluzia că cel mai rău caz a fost definit de un SCS de 30 kHz cu o frecvență purtătoare de 6 GHz, în timp ce cel mai bun caz a fost reprezentat de un SCS de 120 kHz cu o frecvență purtătoare de 28 GHz. Valorile crescute ale performanței obținute în acest studiu au confirmat importanța unei numerologii

flexibile pentru viitoarele sisteme de comunicații. În plus, am verificat că pentru mediul indoor office, debitul maxim este atins mai repede decât pentru mediul street canyon.

6. Partajarea Dinamică a Spectrului în Rețelele 4G/5G

Spectrul curent de frecvență utilizat în comunicații mobile este în mare parte saturat, cuprins între 300 MHz și 6 GHz. Necesitatea unui nou spectru de frecvențe disponibil este obligatorie pentru următoarea generație de dispozitive mobile [19][20]. Având în vedere că spectrul de frecvențe este o resursă limitată, pentru a îmbunătăți eficiența spectrului și pentru a reduce costurile asociate acestuia pentru operator, a fost introdusă o nouă soluție care este investigată: Dynamic Spectrum Sharing (DSS). În acest capitol, performanța unui sistem LTE-NR este evaluată în termeni de debit și lățime de bandă ocupată utilizând tehnologia DSS.

DSS este o soluție care permite operatorilor să utilizeze simultan atât tehnologiile LTE, cât și tehnologiile NR în aceleași benzi de operare de frecvență, deși într-un mod intercalat. Acest lucru aduce un avantaj major pentru operator, deoarece asigură implementarea sistemelor 5G fără a fi nevoie să achiziționeze benzi de spectru dedicate suplimentare. Implementarea tehnologiei DSS este împărțită în două faze: Faza 1 și Faza 2, pentru a facilita desfășurarea acestora [21].

Faza 1 DSS:

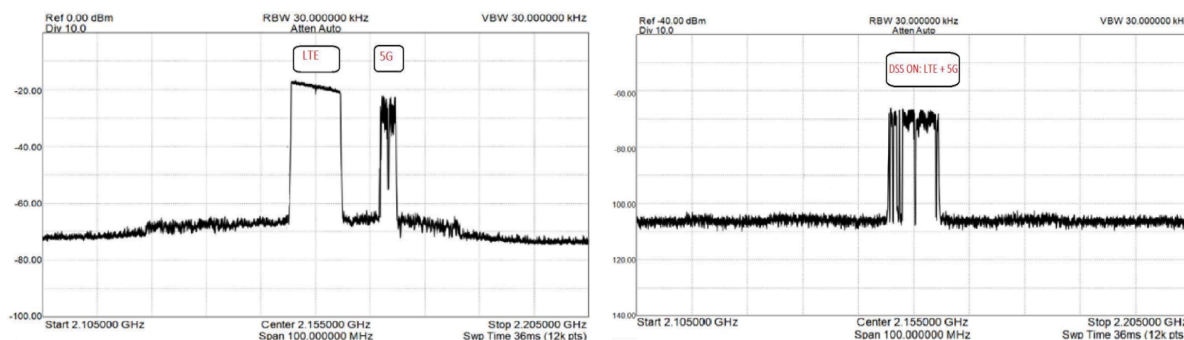


Figura 10: Utilizarea spectrului pentru LTE și NR fără DSS și cu faza 1 DSS.

Figura 10 prezintă utilizarea spectrului pentru LTE-NR pentru ambele cazuri de neutilizare a tehnologiei DSS și, respectiv, la utilizarea acesteia. Se poate observa, pentru cazul din stânga, că fiecare tehnologie avea un spectru de frecvențe separat și dedicat. Pentru cazul din dreapta, se poate observa că ambele tehnologii aveau același spectru de frecvență de 10 MHz.

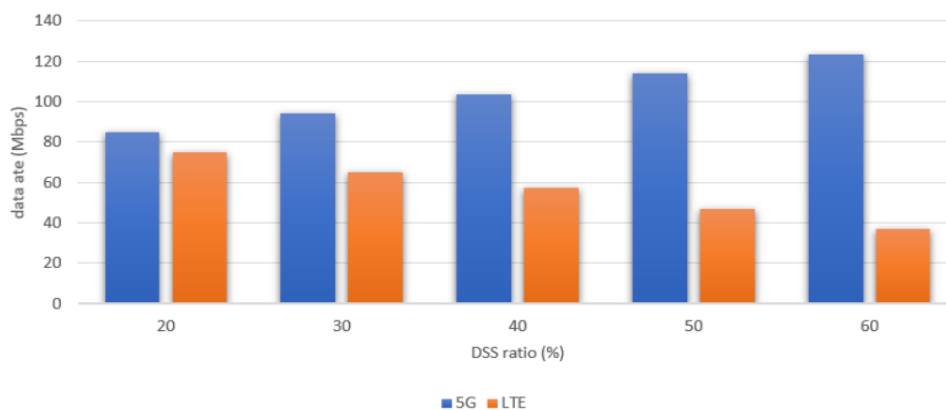


Figura 11: Rezultate de debit pentru diferite rapoarte de partajare folosind Faza 1 DSS.

Figura 11 prezintă rezultatele debitului atunci când se utilizează Faza 1 DSS. Am propus diferite scheme de alocare în funcție de rapoarte de partajare specifice. Am măsurat debitul obținut atât pentru LTE, cât și pentru NR, folosind schemele de alocare propuse pentru fiecare raport de partajare. Rezultatele obținute au demonstrat în mod clar că există un avantaj major în utilizarea tehnologiei DSS datorită faptului că există o reducere a costurilor pentru operatorul de telefonie mobilă, alături de o optimizare a utilizării spectrului.

Cu toate acestea, există un compromis cu privire la debit, dar am arătat că pentru Faza 1 DSS pentru un raport de partajare de 60%, scăderea debitului de NR este de numai 23%, dar în loc să fie nevoie de două lățimi de bandă separate de 10 MHz fiecare, una pentru LTE și una pentru NR, operatorul poate reutiliza lățimea de bandă de 10 MHz a LTE-ului și pentru NR.

Faza 2 DSS:

Schema arhitecturală adoptată pentru măsurătorile pentru Faza 2 DSS este prezentată în figura 12. Au fost luate în considerare două module radio, fiecare având atașat la acesta un atenuator, deoarece măsurătorile au fost efectuate într-un laborator cu distanță mică de utilizatorul mobil.

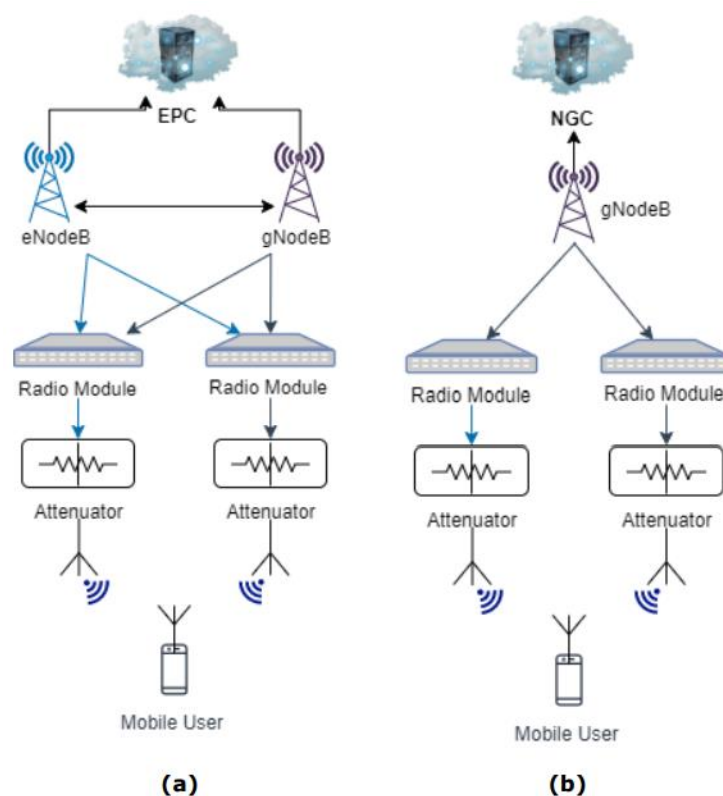


Figura 12: Schema de arhitectură adoptată. (a) arhitectura NSA; (b) arhitectura SA.

Am măsurat debitul pentru arhitectura NSA și SA, pentru ambele direcții: downlink și uplink, pentru diferite cazuri. Principalele caracteristici care diferă de la un caz la altul constau în tipul de modulație adoptat și tipul de MIMO, fie MIMO 2x2, fie 4x4, vezi figurile 13, 14 și 15.

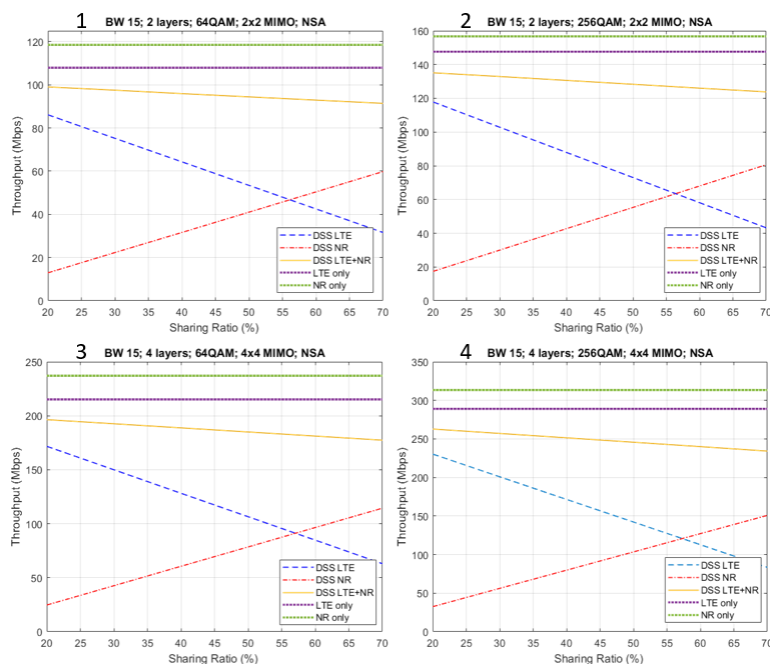


Figura 13: Rezultate de debit pentru arhitectura DL NSA pentru cazurile 1-4.

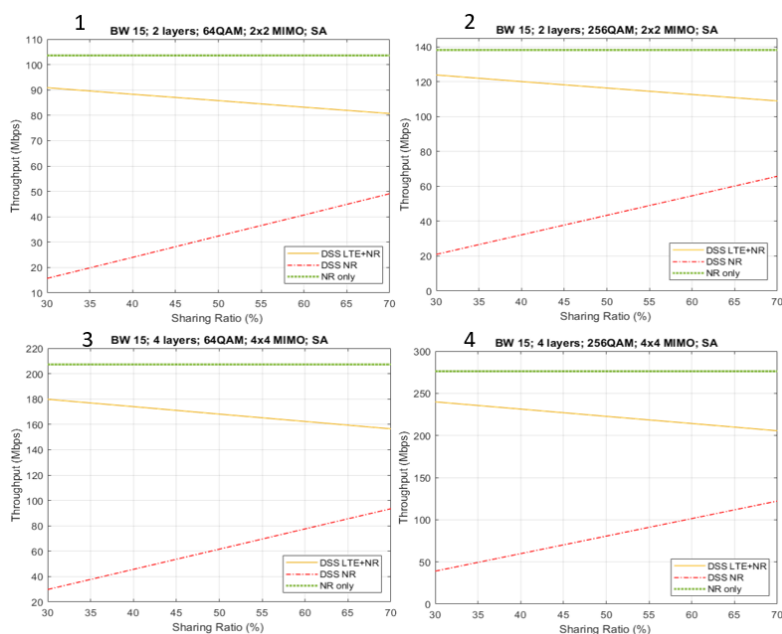


Figura 14: Rezultate de debit pentru arhitectura DL SA pentru cazurile 1-4.

Am observat pierderi între un minim de 10% și un maxim de 26% asupra debitului DSS comparativ cu debitul de NR individual, în funcție de cazul studiat și de raportul de partajare adoptat. Este de anticipat pierderea de debit care are loc atunci când se utilizează DSS, deoarece resursele disponibile au fost partajate între LTE și NR, ceea ce a dus la mai puține resurse dedicate transmisiei NR, comparativ cu un sistem dedicat complet NR. Cu toate acestea, o pierdere între 10% și 26% nu a reprezentat o pierdere procentuală substanțială, ținând seama de faptul că nu era nevoie, din punctul de vedere al operatorului, să cumpere o lățime de bandă nouă, deoarece era împărțită cu tehnologia LTE.

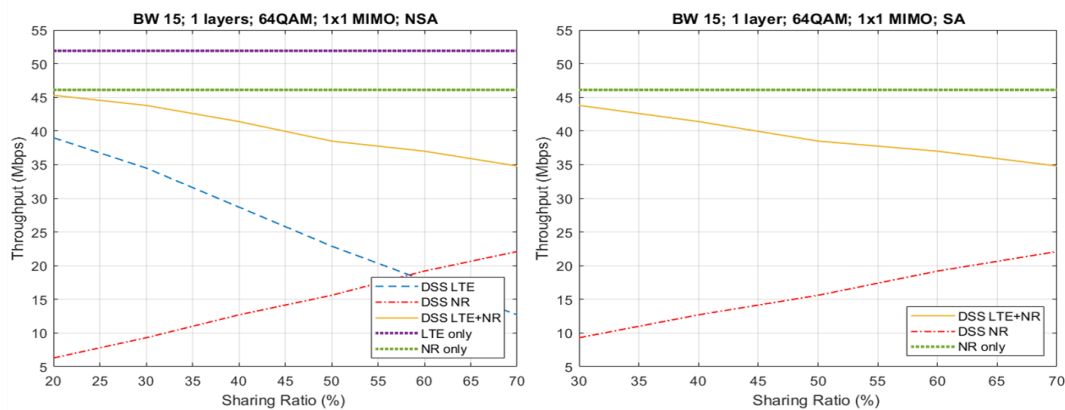


Figura 15: Rezultate de debit pentru cazul 5 UL NSA și SA.

Comparând debitul de DSS LTE+NR și NR individual din figura 15 am ajuns la concluzia că valorile sunt similare. Prin urmare, nicio diferență nu a fost vizibilă între arhitectura NSA și SA. Motivul similarității valorilor obținute este că de la un tip de arhitectură la altul nu este nevoie de transmiterea de canale suplimentare care ar ocupa resurse suplimentare. Am observat o pierdere minimă de 2% la utilizarea unui raport de partajare de 20% și o pierdere maximă de 25% pentru un raport de partajare de 70%, ceea ce înseamnă că LTE a ocupat 30% din resursele disponibile, în timp ce NR a ocupat 70%.

Din rezultatele obținute, a fost clar că utilizarea tehnologiei DSS a adus un avantaj major de a nu avea nevoie de lățime de bandă dedicată suplimentară pentru sistemele NR, ceea ce din punctul de vedere al operatorului a dus la o îmbunătățire a eficienței spectrului și la reducerea costurilor. Principalul compromis al implementării tehnologiei DSS a fost scăderea debitului. Cu toate acestea, așa cum am observat, poate avea loc o pierdere maximă de 25% din debit.

7. Contribuții

Principalele contribuții pentru fiecare capitol sunt enumerate mai jos. Pentru capitolele introductive:

- Prezentarea și descrierea principalelor caracteristici ale sistemelor de comunicații 5G utilizând o abordare organizată, precisă și detaliată.

Pentru capitolul 3, referitor la sub-sețiunea 3.2 - Evaluarea performanței utilizând canale TDL pentru sistemele MIMO 5G, comparația celor trei profiluri TDL pentru medii NLOS a condus la înțelegerea aptitudinii fiecăruia dintre ele, în funcție de cerințele de mediu. În plus:

- Descrierea caracteristicilor tuturor modelelor de canale TDL și CDL pentru ambele medii NLOS și LOS.
- Configurarea setării de simulare pentru a compara performanța profilurilor canalelor TDL_A, TDL_B și TDL_C într-un sistem 5G utilizând diferite scheme de modulație.
- Rezultate de BER și debit ale performanței profilelor TDL_A, TDL_B și TDL_C care ating valori de debit maxime de 165 Mbps, 383 Mbps și 516 Mbps pentru modulația 16QAM, 64QAM și respectiv 256QAM.
- Compararea performanțelor canalelor TDL_A, TDL_B și TDL_C, din care a rezultat că, dacă avem de-a face cu condiții de mediu precare, este mai potrivit să utilizăm profilul TDL_A. În plus, modelul de canal este cel care obține o performanță generală a sistemului mai bună, indiferent de indexul MCS și schema de modulație. Pe de altă parte, profilul TDL_C are nevoie de condiții de mediu extrem de bune pentru a atinge debitul maxim atunci când se utilizează modulația 256QAM, ceea ce nu a fost posibil cu configurarea utilizată.

- Studiu că, pentru a minimiza valorile BER, se propune, din rezultatele obținute, utilizarea profilului TDL_A cu o schemă de modulație mai mare, precum și o valoare a indexului MCS ridicată. Pentru a crește debitul sistemului 5G, se propune adoptarea profilului TDL_A și selectarea valorilor a indexului MCS care au rate de cod țintă mai mari și eficiență spectrală.

În ceea ce privește subsecțiunea 3.3 - Influența DS-ului în modelele de canale TDL și CDL, am ajuns la concluzia asupra valorilor de DS adecvate pentru două dintre profilurile canalelor TDL și CDL. În plus:

- Rezultate BER și debit pentru toate profilurile canalelor TDL și CDL utilizând o valoare de DS de 18 ns. Dintre profilurile NLOS și LOS, se arată că profilurile NLOS au o performanță crescută.
- Analiza influenței DS-ului în performanța sistemului 5G utilizând modelele de canal TDL_E și CDL_A. Pentru TDL_E, din rezultatele obținute, se recomandă adoptarea unor valori de DS scurte, în special 18 și 32 ns, pentru a-i optimiza performanța. Pentru CDL_A, se recomandă adoptarea unui DS de 47 ns.

Pentru capitolul 4, contribuția principală se bazează pe faptul că am demonstrat că utilizarea beamforming-ului este avantajoasă pentru sistemele 5G și din comparația dintre tehnicile de beamforming EBB și GoB am arătat că tehnica GoB este mai valoroasă pentru performanța sistemului. În plus:

- Descrierea funcționalității metodei de beamforming digital GoB și EBB.
- Configurarea setării de simulare pentru a compara ambele metode digitale de beamforming.
- Compararea rezultatelor BER și debit a sistemului 5G utilizând EBB și GoB beamforming. Se arată că tehnica GoB are o rată BER mai mică decât EBB. În ceea ce privește debitul, chiar dacă EBB atinge o valoare maximă ușor mai mare decât GoB, are nevoie de 7 dB suplimentari de SNIR pentru a-l atinge. În concluzie, tehnica GoB este mai avantajoasă decât EBB.

Pentru capitolul 5, contribuția principală constă în consolidarea importanței utilizării unei numerologii flexibile pentru viitoarele sisteme de generație mobilă, precum și:

- Definirea și prezentarea numerologiilor OFDM flexibile propuse pentru 5G și pentru generațiile mobile viitoare.
- Configurarea setării de simulare pentru studiul de numerologie multiplă OFDM propusă pentru sistemele de comunicații 5G.
- Evaluarea numerologiei multiplă OFDM prin obținerea de BER și debit în două scenarii de mediu diferite. Se arată că cea mai bună performanță se obține atunci când se utilizează un SCS de 120 kHz cu o frecvență purtătoare de 28 GHz, urmat de cazul cu un SCS de 60 kHz și o frecvență purtătoare de 28 GHz. Cea mai slabă performanță se obține atunci când se utilizează un SCS de 30 kHz cu o frecvență purtătoare de 6 GHz.
- Studiu că, pentru a îmbunătăți performanța sistemului, adică valori mai mici ale BER și valori mari ale debitului, este necesar să creștem valorile de SCS utilizând în același timp valori mai mari pentru frecvența purtătoare.

Pentru capitolul 6, am efectuat experimente fizice pentru studiul unei noi tehnici numite DSS, care, cum demonstrează rezultatele obținute, aduc avantaje masive din punctul de vedere al operatorului. În special contribuțiile sunt după cum urmează:

- Prezentarea tehnicii noi de partajare dinamică a spectrului, caracteristicile și fazele de lansare, Faza 1 și Faza 2, pentru uplink și downlink.
- Demonstrarea modului în care se calculează raportul de partajare pentru Faza 2 DSS pentru uplink și downlink. Elaborarea configurației pentru configurațiile experimentale fizice pentru măsurători DSS Fază 1 și DSS Fază 2.
- Propunerea diferitelor scheme de alocare a resurselor pentru LTE-NR Faza 1 DSS în

- funcție de diferitele raporturi posibile de partajare.
- Măsurarea debitului sistemului pentru a studia impactul fazei 1 DSS utilizând diferite rapoarte de partajare. Se demonstrează că pentru un raport de partajare de 60%, maximul permis, NR are o scădere a debitului de 23%. Cu toate acestea, 10 MHz suplimentare dedicate NR nu mai sunt necesare, deoarece folosește lățimea de bandă deja existentă a LTE, demonstrând avantajul utilizării fazei 1 DSS.
 - Studiul fazei 2 DSS pentru downlink și uplink utilizând atât arhitecturile NSA, cât și SA. Măsurarea debitului sistemului pentru a evalua impactul fazei 2 DSS utilizând diferite rapoarte de partajare.
 - Calculul pierderii procentuale de transfer DSS LTE+NR în comparație cu NR, obținând valori cuprinse între 10% și 26% pentru downlink și 2% până la 25% pentru uplink. Cu toate acestea, se remarcă faptul că utilizarea DSS aduce avantajul masiv de a nu avea nevoie de lățime de bandă dedicată suplimentară pentru sistemele NR, ceea ce din punctul de vedere al operatorului mobil duce la o îmbunătățire a eficienței spectrale și la reducerea costurilor.

8. Referințe

1. A. Mamane, M. E. Ghazi, **G. Barb** and M. Otesteanu, "5G Heterogeneous Networks: An Overview on Radio Resource Management Scheduling Schemes," 7th Mediterranean Congress of Telecommunications (CMT), pp. Fes, Morocco, 2019.
2. S. S. Das and R. Prasad, "Introduction to 5G," in Evolution of Air Interface Towards 5G," River Publishers, pp. 1-8, 2018.
3. **G. Barb** and M. Otesteanu, "4G/5G: A Comparative Study and Overview on What to Expect from 5G," in International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), Milan, 2020.
4. **G. Barb** and M. Otesteanu, "5G: An Overview on Challenges and Key Solutions," in 2018 International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC), Timisoara, pp. 1-4, 2018.
5. J. Guillermo, "How 5G Relates to SDN and NFV Technologies – Part III: Architecture (Continued)," Dell Technologies, 2019.
6. 3GPP, "Study on channel model for frequency spectrum above 6 GHz," ETSI TR 138 900 V14.2.0, 2017.
7. D. Reed, "On Channel Model Tap Reduction for 5G NR mmW Testing," IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), pp. 464-468, Auckland, 2018.
8. **G. Barb**, M. Otesteanu, G. Budura and C. Balint, "Performance Evaluation of TDL Channels for Downlink 5G MIMO Systems," International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS), Iasi, Romania, 2019.
9. **G. Barb** and M. Otesteanu, "On the Influence of Delay Spread in TDL and CDL Channel Models for Downlink 5G MIMO Systems," IEEE 10th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON), pp. 958-962, New York City, NY, USA, 2019.
10. M. Showkat, J. A. Sheikh and A. I. Khan, "A New Beamforming Technique in 5G Environment for Reliable Transmission," 4th International Conference on Computing Communication and Automation (ICCCA), pp. 1-5, Greater Noida, India, 2018.
11. S. Saur, H. Halbauer, A. Rueegg and F. Schaich, "Grid-of-Beams (GoB) Based Downlink Multi-User MIMO," IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working

Group, 2008.

12. **G. Barb** and M. Otesteanu, "Digital GoB-based Beamforming for 5G Communication Systems," 2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Osaka, Japan, 2020
13. T. Pairon, C. Oestges, M. Drouguet and C. Craeye, "Efficient Evaluation of Energy Focusing Based on Eigen-Beamforming," 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), pp. 1-5, Krakow, Poland, 2019.
14. **G. Barb**, M. Otesteanu, F. Alexa and A. Ghiulai, "Digital Beamforming Techniques for Future Communications Systems," 2020 12th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP), Porto, Portugal, 2020, ISBN: 978-1-7281-6743-5.
15. J. V. e. al., "Numerology and frame structure for 5G radio access," IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), pp. 1-5, 2016.
16. T. Bag, S. Garg, Z. Shaik and A. Mitschele-Thiel, "Multi-Numerology Based Resource Allocation for Reducing Average Scheduling Latencies for 5G NR Wireless Networks," European Conference on Networks and Communications (EuCNC), pp. 597-602, Valencia, Spain, 2019.
17. **G. Barb**, M. Otesteanu, F. Alexa and F. Danuti, "OFDM Multi-Numerology for Future 5G New Radio Communication Systems," International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), Split, Hvar, Croatia, 2020.
18. A. A. Zaidi, R. Baldemair, V. Moles-Cases, N. He, K. Werner and A. Cedergren, "OFDM Numerology Design for 5G New Radio to Support IoT, eMBB, and MBSFN," IEEE Communications Standards Magazine, vol. 2, no. 2, pp. 78-83, June 2018.
19. M. Matinmikko-Blue, S. Yrjölä, V. Seppänen, P. Ahokangas, H. Hämmäinen and M. Latva-aho, "Analysis of Spectrum Valuation Approaches: The Viewpoint of Local 5G Networks in Shared Spectrum Bands," IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), pp. 1-9, Seoul, 2018.
20. L. W. e. al, "4G 5G Spectrum Sharing: Efficient 5G Deployment to Serve Enhanced Mobile Broadband and Internet of Things Applications," IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 13, no. 4, pp. 28-39, 2018.
21. **G. Barb**, M. Otesteanu and M. Roman, "Dynamic Spectrum Sharing for LTENR Downlink MIMO Systems," International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC), Timisoara, 2020.