IOSUD - Universitatea Politehnica Timişoa
Şcoala Doctorală de Studii Inginereşti

Îmbunătățirea sistemelor 5G prin utilizarea tehnologiilor Massive MIMO și beamforming,

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. Andraș Cristina-Maria
conducător științific Prof.univ.dr.ing. Otești eanu Marius-Emil

luna iulie anul 2026

Această teză abordează decalajul tot mai mare dintre cerințele de bandă ale aplicațiilor wireless moderne — streaming video ultra-high-definition, cloud computing, AR/VR și IoT — și limitele de capacitate ale sistemelor tradiționale de comunicații sub-6 GHz. Teza argumentează că spectrul de unde milimetrice (mmWave), datorită benzii de frecvență semnificativ mai largi pe care o pune la dispoziție, este esențial pentru susținerea ratelor de transfer de date multi-gigabit specifice 5G, însă exploatarea sa necesită tehnologii de antenă avansate și tehnici de procesare a semnalului, capabile să contracareze slăbiciunile de propagare inerente benzii mmWave: pierderi de propagare în spațiul liber mai ridicate, capacitate redusă de penetrare și sensibilitate crescută la obstacole fizice. Obiectivul principal al acestei teze de doctorat este analiza și îmbunătățirea performanței sistemelor 5G prin utilizarea tehnologiilor Massive MIMO și beamforming, investigând totodată aspectele operaționale relevante pentru proiectarea și implementarea rețelelor. Cercetarea se concentrează pe relația dintre configurațiile de antenă, condițiile de canal, tehnicile de beamforming, capacitatea sistemului, interferența și comportamentul traficului de date la nivelul de transport.

Teza este structurată pe patru direcții principale de cercetare. Prima direcție prezintă analiza tehnologiilor fundamentale ale 5G, cu accent pe MIMO, Massive MIMO și Beamforming. A doua direcție se concentrează pe evaluarea experimentală și prin simulare a sistemelor 5G, incluzând comparații între soluțiile Open-Loop MIMO și Closed-Loop MIMO. A treia direcție vizează tehnicile de Beamforming, gestionarea fasciculelor (Beam Management) și analiza blocurilor de semnal de sincronizare (Synchronization Signal Block - SSB). A patra direcție privește optimizarea rețelelor 5G, oferind soluții pentru gestionarea interferenței, link budget și controlul congestiei la nivelul de transport.

1. INTRODUCERE

Teza debutează prin trasarea evoluției rețelelor 5G pe fondul creșterii neîntrerupte a traficului de date. Sunt identificate categoriile specifice de servicii care pun presiune pe infrastructura wireless și se explică de ce spectrul sub-6 GHz, luat separat, nu mai poate satisface cererea. Acest lucru motivează trecerea către spectrul mmWave ca principal factor care face posibile ratele de transfer multi-gigabit. Odată cu cererea tot mai mare pentru comunicații wireless moderne, rețelele mobile au fost îmbunătățite pentru a spori calitatea serviciilor (QoS) și pentru a gestiona eficient resursele radio [1].

MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) este o tehnologie importantă, utilizată pe scară largă în sistemele wireless actuale. MIMO folosește antene multiple atât la emițător, cât și la receptor, pentru a îmbunătăți utilizarea spectrului, fiabilitatea și ratele de transfer de date. Massive MIMO a reprezentat una dintre cele mai sofisticate soluții dezvoltate, apărută ca răspuns la numărul tot mai mare de utilizatori conectați. Massive MIMO, o tehnologie-cheie a rețelelor 5G și a celor viitoare, utilizează un număr mare de antene la stația de bază pentru a crește semnificativ capacitatea rețelei, acoperirea și eficiența spectrală. Mai mult, tehnica de beamforming, care direcționează semnalele radio către echipamentul mobil (user equipment - UE) în loc să radieze energia în toate direcțiile, poate îmbunătăți în continuare performanța sistemului. Acest lucru conduce la o calitate mai bună a semnalului, o interferență redusă și o eficiență generală mai ridicată a rețelei. Gestionarea fasciculelor (beam management) este responsabilă de controlul și menținerea fasciculelor de comunicație, pentru a asigura o acoperire eficientă a utilizatorilor aflați în locații și situații de mobilitate diferite. Datorită condițiilor de rețea și comportamentului utilizatorilor, aflate în permanentă schimbare, strategiile de gestionare a fasciculelor trebuie adaptate dinamic pentru a asigura o conexiune stabilă și fiabilă [2].

Optimizarea contribuie în mod semnificativ la performanța generală a rețelelor 5G, asigurând utilizarea eficientă a resurselor radio și de rețea disponibile. Printre principalele elemente de optimizare se numără analiza link budget-ului, pentru estimarea proprietăților de propagare a semnalului și a performanței de acoperire, gestionarea interferenței, pentru a minimiza degradarea performanței cauzată de celulele adiacente și transmisiile simultane, precum și mecanismele de control al congestiei la nivelul de transport, pentru a garanta fluxuri de date stabile în diferite condiții de trafic. Alte tehnici importante de optimizare includ gestionarea resurselor radio, alocarea puterii, echilibrarea congestiei și algoritmii de planificare (scheduling). Combinarea acestor tehnici permite rețelelor 5G să atingă un debit ridicat, o latență redusă, o eficiență spectrală ridicată și o furnizare fiabilă a serviciilor, atât în medii urbane dense, cât și în scenarii de implementare la scară largă. Spectrul mmWave oferă o bandă de frecvență abundentă, însă caracteristicile sale de propagare — pierderi de propagare ridicate, capacitate redusă de penetrare, sensibilitate la obstacole — arată că spectrul brut, singur, nu este suficient. Eficiența spectrală și capacitatea rețelei trebuie îmbunătățite prin tehnici mai inteligente de antenă și procesare a semnalului, ceea ce plasează Beamforming și Massive MIMO drept tehnologiile aflate în centrul acestei cercetări [3].

2. TEHNOLOGII CHEIE PENTRU 5G

Acest capitol construiește fundamentul teoretic. Multiple-Input Multiple-Output este o tehnologie utilizată pe scară largă pentru creșterea eficienței spectrale și a capacității generale a sistemului. Sistemele MIMO folosesc antene multiple la emițător și receptor pentru a transmite simultan mai multe fluxuri de date, crescând astfel ratele de transfer fără a necesita spectru suplimentar. Beamforming-ul MIMO este un subiect de cercetare popular pentru reutilizarea spectrului și menținerea calității.

În practică, merită a se diferenția trei configurații MIMO. Astăzi, majoritatea routerelor Wi-Fi și a echipamentelor utilizatorilor LTE sunt configurate ca sisteme 2×2, cu două antene de transmisie și două de recepție. Configurația 4×4 oferă creșteri semnificative ale eficienței spectrale și devine tot mai frecventă în implementările 5G, unde costurile hardware încă limitează numărul de antene pe care un dispozitiv le poate susține. Massive MIMO este o tehnologie diferită, cu zeci

până la sute de antene concentrate la stația de bază. Principiul fundamental este comun tuturor celor trei configurații: array-ul de antene generează o matrice de canale independente în spațiu, care pot funcționa simultan în cadrul aceleiași benzi de frecvență. În loc să trimită puterea într-o singură direcție, aceasta este distribuită între elementele array-ului, îmbunătățind eficiența și evitând riscul supraîncărcării unei singure căi. Practic, este vorba despre multiplexare spațială, în cazul simplu al doi utilizatori: două fluxuri de date separate, trimise simultan, fără ca un utilizator să reducă lățimea de bandă disponibilă celuilalt [4].

Beamforming este definit ca o tehnică de procesare a semnalului care direcționează transmisia sau recepția undelor electromagnetice către direcții spațiale specifice, prin ajustarea amplitudinii și fazei semnalelor pe mai multe elemente de antenă. În loc să radieze uniform, beamforming-ul concentrează puterea către utilizatorul vizat, îmbunătățind puterea semnalului și reducând interferența către alți utilizatori și celulele învecinate. Beamforming-ul și MIMO merg împreună, deoarece efectuarea beamforming-ului necesită o multitudine de antene. Numărul de antene prezente în rețea poate influența semnificativ calitatea fasciculului folosit de stația de bază (BTS) pentru a comunica cu echipamentul mobil. Mai multe antene înseamnă un fascicul mai îngust, ceea ce înseamnă mai puțină putere necesară pentru transmiterea datelor și mai puțină interferență cu semnalele radio din apropiere. Beamforming-ul îmbunătățește, de asemenea, utilizarea resurselor radio, permițând deservirea simultană a mai multor utilizatori prin separare spațială [5].

Tehnicile de beamforming pot fi clasificate pe baza mai multor criterii, precum modul de aplicare a vectorului de ponderi, lățimea de bandă a semnalului, estimarea canalului sau domeniul semnalului. Tabelul 1 oferă o scurtă descriere a diferitelor tipuri de beamforming [6].

Tabel 1: Tehnici Beamforming [5].

Criteriu	Tipuri de beamforming	
Vector de ponderi	Beamforming fix	Beamforming adaptiv
Locație	Beamforming la transmisie	Beamforming la recepție
Lățime de bandă a semnalului	Beamforming de bandă îngustă	Beamforming de bandă largă
Estimarea canalului	Beamforming implicit	Beamforming explicit
Domeniul semnalului	Beamforming în domeniul frecvență/transformată	Beamforming spațio-temporal Analogic / Digital

Metoda Grid of Beams (GoB) este o schemă comună de gestionare a fasciculelor în sistemele 5G. În loc să se calculeze ponderile optime de beamforming la fiecare moment de timp pe baza condițiilor instantanee ale canalului, aria de acoperire unghiulară este împărțită într-un set fix de fascicule direcționale care acoperă întreaga zonă de serviciu. Fiecare fascicul este generat folosind un vector de beamforming predeterminat dintr-un codebook, fiecare vector corespunzând unei direcții de orientare specifice. Echipamentul utilizator, atunci când funcționează în cadrul

rețelei, testează calitatea fasciculelor disponibile și raportează metricile de performanță asociate, precum Reference Signal Received Power (RSRP), Reference Signal Received Quality (RSRQ) și Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (SINR). Rețeaua folosește aceste măsurători pentru a selecta fasciculul cu cele mai bune condiții de comunicație și actualizează continuu această selecție pentru a se adapta la mobilitatea utilizatorilor și la variațiile mediului radio [7].

Network slicing este o componentă esențială a noii generații de sisteme wireless. Network slicing permite crearea mai multor rețele virtuale pe o infrastructură fizică comună, fiecare fiind personalizată pentru a răspunde cerințelor unei anumite aplicații. Astfel, strategiile de alocare a resurselor trebuie să fie mai flexibile pentru a satisface cerințele diferite și, uneori, chiar contradictorii ale acestor servicii. Se preconizează că viitoarele cadre de alocare a resurselor vor include metodologii de planificare sensibile la consumul de energie, capabile să echilibreze dinamic debitul, latența și eficiența energetică, în funcție de condițiile rețelei. Aceste concepte noi permit evoluția de la 5G la 6G și promovează rețele inteligente, adaptive, sustenabile și de înaltă performanță.

Acest capitol rezumă principiile principale, arhitectura și implementările practice ale tehnologiilor MIMO și beamforming. Aceste tehnologii sunt esențiale în rețelele 5G și vor rămâne importante și în viitoarele sisteme 6G, unde sunt necesare rate de transfer mai mari, o eficiență spectrală mai bună, o acoperire mai largă și o fiabilitate îmbunătățită [8].

3. MĂSURĂTORI EXPERIMENTALE ÎN SISTEME MIMO 5G

Acest capitol analizează modul în care Massive MIMO și beamforming contribuie împreună la creșterea debitului și a eficienței spectrale în sistemele de comunicații 5G. Rezultatele simulărilor, combinate cu experimentele practice, arată că extinderea array-ului de antene — de la configurații mai mici, de tip 4×4, până la array-uri de mare scară, de tip 64×64 — aduce îmbunătățiri substanțiale atât în ceea ce privește ratele de transfer de date, cât și fiabilitatea rețelei. Este prezentat un studiu comparativ al tehnicilor de transmisie MIMO Open-Loop (OL) și Closed-Loop (CL). Impactul extinderii numărului de antene asupra performanței generale a rețelei a fost investigat pe trei configurații MIMO — 4×4, 16×16 și 64×64. Dintre acestea, configurația MIMO 64×64 demonstrează cea mai mare diversitate spațială. Utilizarea mai multor antene permite sistemului să exploateze mai bine propagarea multipath, ceea ce conduce la o fiabilitate îmbunătățită a legăturii și la rate de transfer mai mari. Comparativ cu sistemele 4×4 și 16×16, configurația 64×64 oferă o capacitate și performanțe superioare în medii wireless congestionate, unde numeroși utilizatori concurează pentru resurse radio limitate.

Aceste rezultate confirmă avantajele MIMO la scară mare, în special pentru aplicațiile care necesită capacitate, fiabilitate și eficiență spectrală ridicate. Cu toate acestea, trebuie luate în considerare mai multe provocări practice de implementare, printre care erorile de estimare a canalului, constrângerile hardware, complexitatea crescută a procesării semnalului și costurile de implementare mai ridicate. Prin urmare, deși sistemele MIMO de dimensiune mare, precum 64×64, oferă îmbunătățiri semnificative de performanță, aceste beneficii pot fi limitate în implementările din lumea reală, dacă aceste provocări tehnice nu sunt abordate corespunzător [9].

Performanța beamforming-ului poate fi evaluată folosind Massive MIMO Channel System. Obiectivul principal al simulatorului este de a îmbunătăți precizia și fiabilitatea semnalului prin reproducerea localizării și monitorizării echipamentului mobil. Prin reproducerea poziției UE, a urmăririi acestuia, a fluctuațiilor de putere și a altor caracteristici într-un mediu de testare MIMO,

acest echipament urmărește să crească debitul atât pe direcția uplink, cât și pe cea downlink, îmbunătățind în același timp calitatea și robustețea semnalului. Simulatorul Air Interface MIMO suportă până la 64 de canale și 16 fluxuri, ieșirile unităților radio (RU) fiind conectate la intrările echipamentului, iar ieșirile echipamentului fiind legate la UE-uri. Echipamentul funcționează ca un sistem matriceal complet pentru controlul amplitudinii și fazei canalului, permițând poziționarea și alocarea echipamentului utilizator către fascicule specifice și creând astfel un mediu de testare flexibil. Deoarece semnalele uplink și downlink sunt gestionate independent, configurația oferă o simulare realistă a unui test Over-the-Air (OTA).

Combinarea evaluării teoretice cu testarea practică pe echipamentul Massive MIMO Channel System (MCS) este utilizată pentru a valida rezultatele teoretice de débit în condiții de funcționare realiste. Rezultatele evidențiază o sinergie puternică între beamforming și MIMO: prin concentrarea energiei semnalului către utilizatori specifici, beamforming-ul reduce interferența și crește eficiența spectrală generală.

Măsurătorile practice au fost realizate folosind echipamentul MCS, care funcționează ca o cameră conductoare pentru câmp îndepărtat (far-field), pentru a determina performanța de débit într-un sistem 5G și pentru a ajusta direcțiile fasciculelor în vederea obținerii unui debit optim. Au fost evaluate două scenarii distincte:

Scenariul 1: Validarea debitului pentru o singură celulă, cu 1×UE.

Scenariul 2: Validarea traficului simultan pentru 4×UE-uri.

În Scenariul 1, accentul este pus pe obținerea unui débit măsurat cât mai apropiat de maximul teoretic, pentru un singur UE, într-un mediu cu o singură celulă. Configurația testată vizează un débit DL 5G de 726 Mbps. Scenariul de test are o lățime de bandă de canal de 40 MHz și o frecvență purtătoare de 3,6 GHz. Se utilizează Time Division Duplex ca metodă de implementare pentru o utilizare eficientă a frecvenței, precum și modulație 256QAM.

Configurația hardware este prezentată în Figura 1. MCS este conectat la o unitate radio care funcționează în mod Closed Loop MIMO 8×4, echipamentul servind drept extensie a modulului radio convențional, prin conectarea unităților radio la UE-uri. Poziționarea UE pe un anumit fascicul se realizează prin configurarea parametrilor statici de scanare a fasciculului în meniul MCS, respectiv spațierea verticală a elementelor, coordonatele MCS orizontale/verticale ale fasciculului și unghiul fasciculului.

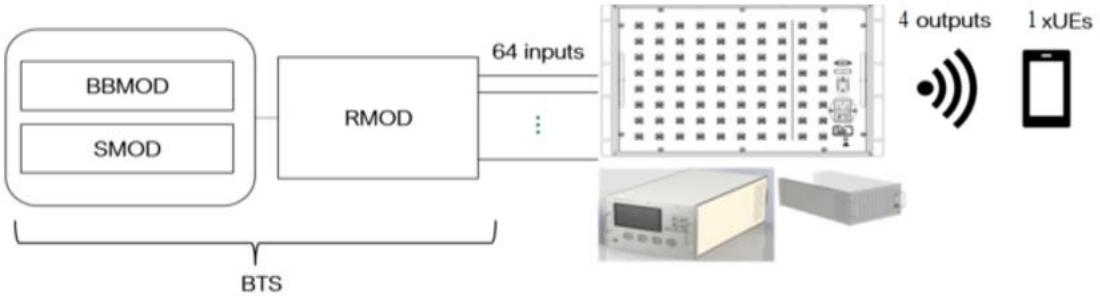


Figura 1: Echipament de test - Scenariu 1 [10].

Măsurătorile practice au atins 695 Mbps, demonstrând că MCS poate recrea cu succes condiții radio optime și poate atinge niveluri de performanță apropiate de țintele teoretice. Obiectivul a fost atingerea unui debit teoretic de 726 Mbps, iar valoarea măsurată a fost de aproximativ 695 Mbps. Testarea a fost realizată într-un scenariu cu o singură celulă. În plus,

simulatorul Air Interface MIMO permite monitorizarea și configurarea orientărilor fasciculelor, oferind posibilitatea unor ajustări precise care ajută la obținerea unor condiții radio optime și la un débit în timp real cât mai apropiat de limitele teoretice posibile.

Scenariul 2 examinează impactul creșterii numărului de antene, utilizând validarea simultană a traficului cu 4×UE-uri. Este utilizată o configurație de antenă 32T32R, folosind 16 ieșiri ale simulatorului pentru a deservi simultan toate cele patru mobile. Echipamentul a fost conectat direct la antenele unui modul radio Massive MIMO specific. Cu o capacitate de 64 de canale și 16 fluxuri, echipamentul este integrat cu un modul radio convențional prin conectarea porturilor de ieșire ale unităților radio la intrările MCS; ieșirile echipamentului sunt apoi conectate la terminalele UE. Pentru a preveni interferența, UE-urile sunt distribuite pe coordonate orizontale diferite, păstrând aceeași axă verticală. Figura 2 prezintă mediul de testare pentru Scenariul 2.

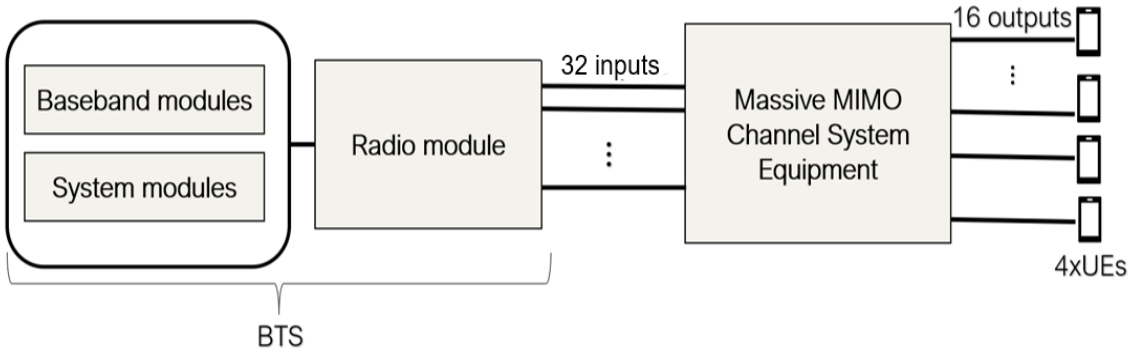


Figura 2: Echipament de test - Scenariu 2 [11].

Sistemul a atins un trafic total de celulă de 4,077 Gbps, dispozitivele mobile fiind asociate pentru a permite transmisia și recepția simultană a datelor. Utilizarea a 16 antene a permis alocarea separată a traficului pentru fiecare UE — de exemplu, UE1 a atins 1,32 Gbps, în timp ce UE4 a atins 0,865 Gbps — confirmând faptul că Massive MIMO poate livra trafic individual de mare viteză către mai mulți utilizatori concurenți, în cadrul aceleiași celule. Scenariul 2 ilustrează beneficiile obținute prin testarea simultană cu o strategie 16DL8UL, demonstrând că patru UE-uri pot funcționa în cadrul unei singure celule 5G, fiecare experimentând un nivel distinct de trafic.

În concluzie, acest capitol reprezintă o validare cuprinzătoare a importanței Massive MIMO și Beamforming în dezvoltarea tehnologiei 5G. Pornind de la simulările privind extinderea numărului de antene și ajungând la testarea debitului multi-utilizator într-un cadru experimental, rezultatele confirmă faptul că array-urile de antene de mare scară, combinate cu beamforming-ul, sunt esențiale pentru satisfacerea cerințelor 5G — asigurând rețelei o capacitate suficientă pentru serviciile emergente, menținând în același timp fiabilitatea conexiunii.

4. Tehnici de Beamforming: Gestionarea Fasciculelor și Analiza SSB-urilor

Beamforming este o tehnică avansată de procesare a semnalului, folosită pentru a crea tipare de radiație a antenei care direcționează semnalele către terminale specifice, reducând totodată interferența, crescând puterea semnalului recepționat de fiecare utilizator și reducând interferența provenită de la alți utilizatori, în vederea îmbunătățirii capacității totale. Aceasta îmbunătățește performanța sistemului prin creșterea eficienței energetice, a securității, a compatibilității cu mmWave, a SNR, a filtrării spațiale, a capacității multi-utilizator și a transmisiei

direcționale, obținute prin aplicarea ponderilor calculate asupra elementelor individuale de antenă, în general prin algoritmi de procesare digitală a semnalului (DSP), care estimează direcția de sosire (Direction of Arrival). Această metodă este esențială pentru frecvențele de peste 6 GHz și este de asemenea aplicabilă benzilor sub-6 GHz.

Acest capitol acoperă gestionarea fasciculelor și rolul blocurilor de semnal de sincronizare în diferite scenarii de implementare. Se arată cum eficiența spectrală ridicată, performanța semnalului, acoperirea și capacitatea oferite de beamforming sunt esențiale pentru a permite servicii 5G precum eMBB, URLLC și mMTC [5].

Beam Management (BM) joacă un rol esențial în funcționarea tehnologiei 5G NR. Procesele de Nivel 1 și Nivel 2 sunt responsabile pentru stabilirea și menținerea legăturilor optime de perechi de fascicule (beam-pair links) între gNodeB și UE. Gestionarea fasciculelor în rețelele 5G NR, în special în implementările cu unde milimetrice, necesită un volum semnificativ de semnalizare suplimentară (overhead), generat de măsurătorile, feedback-ul și coordonarea fasciculelor. Raportarea fasciculelor pe UL reprezintă aproximativ 15% din acest overhead, care crește odată cu o implementare mai densă a array-ului de antene și cu dimensiunea mai mare a codebook-ului de fascicule.

Gestionarea fasciculelor cuprinde cinci operațiuni în cadrul Stabilirii Inițiale a Fasciculului (Initial Beam Establishment - IBE): scanarea fasciculului (beam sweeping), măsurarea, determinarea, raportarea și recuperarea, așa cum se arată în Figura 3.

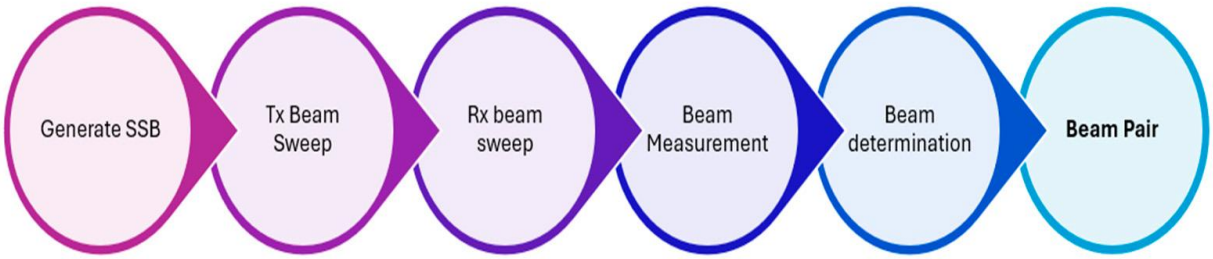


Figura 3: Procesul de Beam Management [5].

Analiza spectrogramei blocurilor de semnal de sincronizare, atât în medii FR1, cât și FR2, arată că structura flexibilă timp-frecvență a 5G permite un număr mai mare de SSB-uri transmise, combinat cu o spațiere mai mare a subpurtătoarelor, pentru a obține o utilizare mai bună a spectrului și o distribuție temporală mai densă a SSB-urilor — ceea ce permite o scanare mai rapidă a fasciculelor (beam sweeping) și o sincronizare mai eficientă. Rezultatele simulărilor arată o relație direct proporțională între directivitatea fasciculului și puterea semnalului: fasciculele mai înguste îmbunătățesc RSRP și selectivitatea spațială, în timp ce fasciculele mai largi asigură un acces mai facil și o dobândire mai ușoară a acoperirii. Prin urmare, este necesar un echilibru optim între directivitatea fasciculului, câștigul de beamforming și overhead-ul de sincronizare, pentru a obține cea mai bună performanță a sistemului. Mai mult, SSB-urile îmbunătățesc acoperirea spațială și selecția fasciculului, dar cresc overhead-ul de semnalizare [12].

În ansamblu, optimizarea SSB-urilor, a scanării fasciculului și a selecției fasciculului contribuie la eficientizarea procedurii de acces, prin reducerea întârzierii de acces, îmbunătățirea descoperirii celulei (cell discovery) și creșterea fiabilității în zonele urbane dense.

5. OPTIMIZAREA OPERAȚIUNILOR ÎN REȚELELE 5G

Acest capitol se concentrează pe două aspecte critice ale optimizării rețelelor 5G: analiza interferenței și a link budget-ului, precum și mecanismele de control al congestiei la nivelul de transport (Transport Layer), bazate pe modele specifice de trafic. Pentru a sprijini evaluarea performanței prin simulare, sunt definiți parametri-cheie care diferențiază cerințele uplink și downlink, atât în scenarii cu o singură celulă, cât și în scenarii cu mai multe celule. Cei cinci parametri principali de performanță considerați sunt: blocurile de resurse fizice (physical resource blocks), debitul utilizatorului, debitul celulei și latența.

Marja de interferență în proiectarea unei rețele 5G reprezintă o marjă de siguranță estimată științific în cadrul procesului de link budgeting. Analiza link budget-ului arată că marja de interferență este un parametru important în evaluarea acestuia, întrucât reduce considerabil interferența pe același canal (co-channel interference). Metodologia calculează factorul de distribuție geometrică, sub ipoteza că toate stațiile de bază transmit la aceeași putere. Simulările realizate cu un sistem massive MIMO cu 64 de antene de transmisie și 1×UE, la 3,6 GHz, au demonstrat efectul semnificativ al marjei de interferență asupra SINR-ului rezultat, evidențiind importanța acesteia în crearea unei infrastructuri 5G fiabile și eficiente [13].

Protocolul de Control al Transmisiei (TCP) este esențial pentru asigurarea unei livrări fiabile a datelor de la un capăt la altul (end-to-end), fiind conceput pentru a susține rate de transfer de până la 400 Gbps. Analiza performanței TCP în medii 5G explorează modul în care diverse tehnici de gestionare a congestiei afectează comportamentul rețelei, în special în condiții de trafic de mare viteză și densitate ridicată. Performanța controlului congestiei la nivelul de transport în rețelele 5G este evaluată prin trafic File Transfer Protocol (FTP), comparând FTP cu și fără mecanismul TCP slow-start, folosind indicatori de performanță precum debitul utilizatorului și al celulei, timpul de dus-întors (Round-Trip Time - RTT), latența și utilizarea PRB, în cadrul a două scenarii distincte [14].

Controlul congestiei în rețelele 5G poate fi realizat la diferite niveluri ale stivei de protocoale. Soluțiile la nivel de rețea sunt utilizate pentru gestionarea traficului, însă controlul tradițional al congestiei se realizează la nivelul de transport, folosind TCP, pentru a asigura o livrare fiabilă a datelor de la un capăt la altul. Serviciile eterogene, conectivitatea extinsă și tiparele de trafic extrem de dinamice pot conduce rapid la scenarii de congestie. Acest lucru este valabil în special pentru necesitatea unui control eficient al congestiei la nivelul de transport.

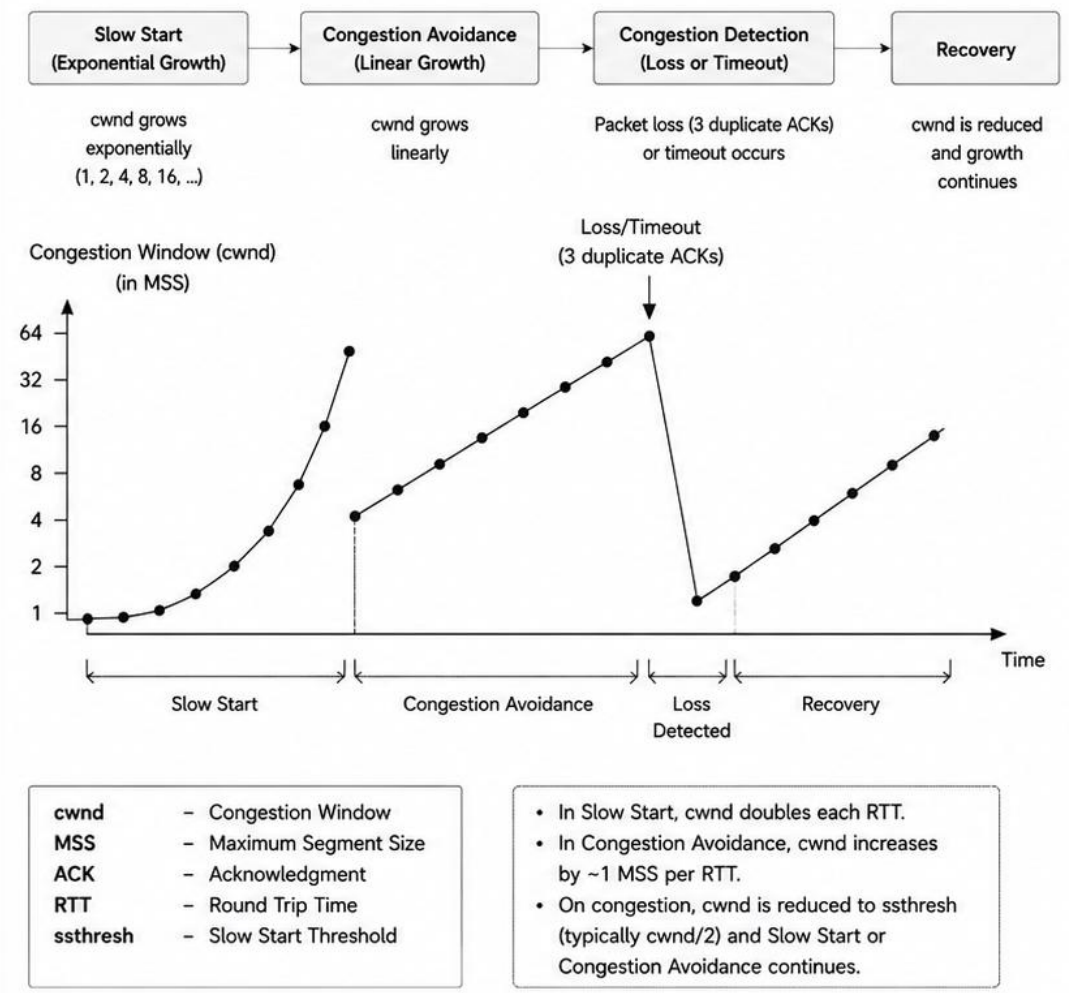


Figura 4: Diagrama de congestie.

Rezultatele simulării clarifică performanța TCP în rețelele 5G, în situația congestiei pe transmisiile uplink și downlink. În acest studiu, metricile de performanță considerate sunt debitul celulei, debitul utilizatorului celulei, latența, utilizarea PRB și volumul de date pe uplink. Rezultatele arată că un utilizator tipic aflat la marginea celulei poate susține un débit de 5 Mbps în scenariul uplink, cu o utilizare PRB de 23–30%, în funcție de anumiți parametri de sistem. Întârzierea de transmisie este redusă până la o utilizare PRB de 85–95%, crescând drastic ulterior.

Aici intervine algoritmul TCP slow start, care reduce semnificativ latența. Acest lucru se datorează faptului că datele sunt împărțite în pachete mai mici, care pot fi trimise mai rapid decât pachetele mai mari, de 500 kB, care ar necesita mai multe sloturi. Volumul de date pe downlink este menținut între 80% și 90% din utilizarea PRB, cu debite maxime de 1,2 Gbps într-un scenariu cu o singură celulă și 800 Mbps într-un scenariu multicelular. Latența maximă a fost de 45 ms pentru scenariul cu o singură celulă și de 55 ms pentru scenariul cu mai multe celule, în cazul utilizatorilor aflați la marginea celulei. Debitul la marginea celulei a fost de 20 Mbps [15].

6. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII

Această teză investighează aplicarea tehnicilor Massive MIMO, Beamforming și Gestionarea Fasciculelor (Beam Management) pentru îmbunătățirea eficienței sistemelor 5G, prin analiză teoretică, simulări, măsurători de parametri, planificarea rețelei și optimizarea nivelului de transport.

Prima contribuție constă într-un studiu teoretic al sistemului Massive MIMO și al tehnicii de Beamforming, în care se analizează modul în care diferite configurații de antenă, condiții de propagare și tehnologii de transmisie afectează capacitatea, eficiența și debitul. Această analiză combină modelarea analitică cu simulări care demonstrează beneficiile creșterii numărului de antene și ale utilizării multiplexării spațiale pentru sporirea capacității, fără a compromite eficiența spectrală.

A doua contribuție verifică performanța Massive MIMO în mod experimental, folosind Massive MIMO Channel System. În loc să se bazeze exclusiv pe comparații și predicții analitice, acest studiu validează rezultatele teoretice printr-o experimentare în condiții reale, demonstrând că valori de débit apropiate de țintele teoretice pot fi, într-adevăr, atinse în condiții de canal adecvate.

A treia contribuție abordează tehnicile de beamforming și de gestionare a fasciculelor în sistemele 5G NR. Aceasta oferă o discuție cuprinzătoare privind tehnologiile de beamforming analogic, digital și hibrid, alături de o analiză a scanării fasciculului (beam sweeping), măsurării, determinării, raportării și recuperării — explicând importanța acestora pentru menținerea unor conexiuni fiabile în rețele puternic direcționale. Studiul examinează, de asemenea, Blocurile de Semnal de Sincronizare (SSB) și rolul lor în accesul inițial și în selecția fasciculului, conducând la o a patra contribuție: evaluarea sincronizării bazate pe SSB prin analiza spectrogramei, acoperind scenarii de implementare în Intervalele de Frecvență 1 și 2, precum și impactul spațierii subpurtătoarelor, al intervalului de frecvență și al numărului de SSB-uri transmise.

O contribuție suplimentară constă în dezvoltarea unei tehnici de estimare a marjei de interferență pentru calculele de link budget pe downlink în 5G. Această tehnică include estimarea distribuției geometrice, estimarea raportului semnal-interferență și estimarea încărcării celulelor învecinate, evidențiind o corelație puternică între încărcarea rețelei și marja de interferență necesară. Teza aduce, de asemenea, o contribuție prin analiza mecanismelor de control al congestiei la nivelul de transport și a comportamentului acestora în medii wireless, examinând modul în care mecanismele fundamentale TCP — slow start, evitarea congestiei (congestion avoidance), retransmisia rapidă (fast retransmission) și recuperarea rapidă (fast recovery) — funcționează, ținând cont totodată de provocarea suplimentară potrivit căreia pierderile de pachete în rețelele wireless pot fi cauzate de condițiile de canal, și nu de congestie.

În final, teza discută rezultatele obținute în raport cu tehnologiile anticipate a influența dezvoltarea viitoare a sistemelor Beyond-5G și 6G, precum optimizarea rețelei bazată pe inteligență artificială, RAN-uri cloud-native, network slicing, comunicații eficiente energetic, suprafețe inteligente reconfigurabile (RIS) și massive cell-free MIMO. Aceste contribuții îmbunătățesc înțelegerea teoretică și oferă orientări practice pentru comunicațiile Massive MIMO,

Beamforming și Gestionarea Fasciculelor, planificarea rețelelor radio și optimizarea nivelului de transport, constituind o bază pentru proiectarea viitoarelor sisteme de comunicații wireless de mare capacitate.

BIBLIOGRAPHY

[1] M. J. Kinol. A, "Performance Analysis of Conventional MIMO and Massive MIMO Systems with MRT Beamforming," in 2026 3rd International Conference on Research Methodologies in Knowledge Management, Artificial Intelligence and Telecommunication Engineering (RMKMATE), Chennai, India: IEEE, Apr. 2026, pp. 1–5. doi: 10.1109/RMKMATE69073.2026.11518717.

[2] R. Chataut and R. Akl, "Massive MIMO Systems for 5G and beyond Networks—Overview, Recent Trends, Challenges, and Future Research Direction," *Sensors*, vol. 20, no. 10, p. 2753, Jan. 2020, doi: 10.3390/s20102753.

[3] C.-M. Andras, T.-O. Pacurar, and A.-M. Silaghi, "Spectral Efficiency Evaluation of Resource Allocation Types in 5G NR Downlink Scheduling".

[4] I.-A. Manea, F. Alexa, M.-I. Coșnița, and C.-M. Andraș, "MIMO Systems in 5G: a Review".

[5] C. M. Andras, G. Barb, and M. Otesteanu, "Comparative Analysis of Beamforming Techniques and Beam Management in 5G Communication Systems," *Sensors*, vol. 25, no. 15, p. 4619, Jul. 2025, doi: 10.3390/s25154619.

[6] C.-M. Andras, T.-F. Rîcoiu, D.-A. Drugea, G. Barb, and M. Oteşteanu, "An Overview and Classification on Beamforming Techniques for 5G Systems," in *2024 International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC)*, Timisoara, Romania: IEEE, Nov. 2024, pp. 1–4. doi: 10.1109/ISETC63109.2024.10797375.

[7] G. Barb and M. Otesteanu, "Digital GoB-based Beamforming for 5G Communication Systems," in *2020 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, Jan. 2021, pp. 469–470. doi: 10.23919/ISAP47053.2021.9391286.

[8] G. Wikstrom *et al.*, "Challenges and Technologies for 6G," in *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, Levi, Finland: IEEE, Mar. 2020, pp. 1–5. doi: 10.1109/6GSUMMIT49458.2020.9083880.

[9] C. M. Andras, G. Barb, and M. Otesteanu, "Massive MIMO in 5G: Capacity Trade-offs Between Open Loop and Closed Loop MIMO".

[10] C. M. Andras, C.-E. Gruin, G. Barb, C. Balint, and F. Alexa, "5G DL Throughput Measurement using Massive MIMO Channel System Tool with Beamforming," in *2023 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS)*, Iasi, Romania: IEEE, Jul. 2023, pp. 1–4. doi: 10.1109/ISSCS58449.2023.10190947.

[11] M.-I. Cosnita, C. M. Andras, F. Alexa, and T. Petrita, "Throughput Performances in 5G MIMO System," in *2024 Advanced Topics on Measurement and Simulation (ATOMS)*, Constanta, Romania: IEEE, Aug. 2024, pp. 136–139. doi: 10.1109/ATOMS60779.2024.10921498.

[12] M. Giordani, M. Polese, A. Roy, D. Castor, and M. Zorzi, "A Tutorial on Beam Management for 3GPP NR at mmWave Frequencies," *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 21, no. 1, pp. 173–196, 2019, doi: 10.1109/COMST.2018.2869411.

[13] C. M. Andras, G. Barb, and M. Otesteanu, "Interference Margin Estimation in DL Link Budget Calculations for 5G Communication Systems," in *2024 IEEE INC-USNC-URSI Radio Science Meeting (Joint with AP-S Symposium)*, Florence, Italy: IEEE, Jul. 2024, pp. 238–239. doi: 10.23919/INC-USNC-URSI61303.2024.10632358.

[14] C. M. Andras, G. Barb, C. Balint, and F. Alexa, "Congestion Study of Transport Layer in DL 5G Communication Systems," in *2022 International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC)*, Timisoara, Romania: IEEE, Nov. 2022, pp. 1–4. doi: 10.1109/ISETC56213.2022.10010331.

[15] C. M. Andras, G. Barb, F. Alexa, and C. Balint, "Congestion Analysis of Transport Layer in a Multicell 5G DL Communication System," *Sensors*, vol. 23, no. 13, p. 6111, Jul. 2023, doi: 10.3390/s23136111.