



UNIVERSITATEA “POLITEHNICA” DIN BUCUREȘTI

ȘCOALA DOCTORALĂ ETTI-B

Nr. Decizie 537 din 28.07.2020

TEZĂ DE DOCTORAT

-REZUMAT-

Algoritmi și Proceduri Inovative în Sisteme de
Comunicații Digitale 5G

Doctorand: Ing. Răzvan-Florentin TRIFAN

COMISIA DE DOCTORAT

Președinte	Prof. dr. ing. Gheorghe BREZEANU	de la	Univ. “Politehnica” din București
Conducător de doctorat	Prof. dr. ing. Constantin PALEOLOGU	de la	Univ. “Politehnica” din București
Referent	Prof. dr. ing. Daniela TĂRNICERIU	de la	Univ. Tehnică “Gheorghe Asachi” din Iași
Referent	Prof. dr. ing. Ioan NICOLAESCU	de la	Acad. Tehnică Militară “Ferdinand I” din București
Referent	Prof. dr. ing. Călin VLĂDEANU	de la	Univ. “Politehnica” din București

București 2020

Cuprins

1	Introducere	1
1.1	Scopul tezei de doctorat	1
1.2	Conținutul tezei de doctorat	1
2	Sistemele de comunicații 5G	2
3	Elemente de teorie MIMO	4
3.1	Canalul MIMO	5
3.2	Generarea corelației la emisie	5
3.3	Compatibilitatea spațială	6
4	Algoritmi de precodare	6
4.1	Rezultatele simulărilor	8
5	Gruparea utilizatorilor	10
5.1	Algoritmul K-Means	10
5.2	Rezultatele simulărilor	10
6	Localizarea și distribuirea spațială a apelurilor în rețelele mobile	13
6.1	Implementarea algoritmului de localizare în 3D	13
6.2	Crearea bazei de date de măsurători	14
6.3	Generarea distribuției traficului	14
6.4	Rezultatele simulărilor	14
7	Simularea și calibrarea algoritmului de ordonare a utilizatorilor	15
7.1	Modelarea algoritmului de ordonare	16
7.2	Rezultatele simulărilor	18
8	Concluzii	18
8.1	Rezultate obținute	18
8.2	Contribuții originale și lucrările publicate	19
8.3	Perspective de dezvoltare ulterioară	20
	Bibliografie	21

1 Introducere

În domeniul telecomunicațiilor, 5G reprezintă a 5-a generație a tehnologiei destinate rețelelor celulare. Sistemele de comunicații cu antene multiple [Multiple-Input-Multiple-Output (MIMO)] sunt utilizate în rețelele de comunicație 5G pentru creșterea capacității de date a legăturii radio.

Tehnicile MIMO reprezintă schemele de procesare digitală a semnalelor folosite pentru transmiterea mai multor fluxuri de date prin canalul radio, cu aceleași resurse de timp și frecvență. Se va folosi termenul de precodare pentru a descrie oricare din tehnicile de procesare a semnalelor în sistemele MIMO multi-utilizator (MU-MIMO), aplicate semnalelor înainte de emisie.

1.1 Scopul tezei de doctorat

La baza utilizării sistemelor MIMO pentru creșterea stabilității și a capacității legăturii radio, este procesarea digitală a semnalelor. Precodarea este o tehnică de procesare a semnalelor implementată la emisie. Ea este utilizată cu precădere în comunicațiile MU-MIMO, unde locația aleatoare a utilizatorilor nu permite decodarea simultană a fluxurilor de date recepționate de la antenele de emisie.

Un prim obiectiv al acestei lucrări este identificarea metodelor de simulare a funcționării unui sistem MU-MIMO. Astfel, au fost propuse diverse scenarii și modele de canal necesare evaluării performanței algoritmilor de precodare.

Un al doilea obiectiv este studiul performanțelor schemelor de precodare existente în literatură, în diverse condiții de corelație spațială și temporală. Acest studiu a dus la identificarea și optimizarea funcționării unei scheme de precodare hibridă.

Al treilea și principalul obiectiv al acestei lucrări este ameliorarea performanței unei scheme de precodare hibridă, prin reducerea complexității identificării grupurilor de utilizatori separabili spațial. Aceasta a condus la implementarea unui algoritm statistic de grupare a utilizatorilor, pe baza compatibilității lor spațiale.

Pentru un studiu corect al performanței schemei de precodare și al algoritmului de grupare, un alt obiectiv al tezei este evaluarea unei metode de generare a distribuției realiste a traficului, utilizând trase de măsurători ale apelurilor, localizate în prealabil în trei dimensiuni (3D).

1.2 Conținutul tezei de doctorat

Lucrarea de față este organizată după cum urmează. În Capitolul 2 sunt prezentate conceptele legate de sistemele de comunicație 5G. Capitolul 3 descrie conceptele de bază necesare înțelegerii domeniului MIMO. Este introdusă modelarea canalului radio împreună cu o metodă de modelare a corelației spațiale și temporale, și o modalitate de evaluare a separației spațiale dintre utilizatori. În Capitolul 4 sunt trecute în

revistă principalele tehnici de precodare și este evaluată performanța lor din punct de vedere al eficacității spectrale și al complexității de calcul. În Capitolul 5 este propus un algoritm de grupare a utilizatorilor pe baza corelației spațiale dintre ei. Algoritmul de grupare și performanța schemei de precodare hibridă sunt evaluate apoi din punct de vedere al complexității de calcul și al eficacității spectrale. Capitolul 6 prezintă o metodă de generare a unei distribuției spațiale realiste a utilizatorilor, utilizată în evaluarea performanței algoritmului de grupare și a schemei de precodare hibridă din Capitolul 5. Capitolul 7 prezintă o metodă de ordonare și selecție a utilizatorilor prin definirea unui ordonator configurabil ce este apoi calibrat pe baza performanțelor unei implementări dintr-o stație de bază reală. În Capitolul 8 sunt rezumate rezultatele obținute în cadrul cercetării, sunt subliniate contribuțiile originale și nu în ultimul rând, sunt descrise perspectivele de dezvoltare ulterioară.

2 Sistemele de comunicații 5G

Standardul 5G dezvoltat de grupul 3rd Generation Partnership Project (3GPP) este numit Noul Radio [New Radio (NR)]. Înainte de publicarea versiunii finale a standardului 5G NR, versiunea 15, conceptele cheie rezultate din documentele întrunirilor grupului radio din 3GPP au fost publicate în [1].

Scenarii de funcționare și tehnologii utilizate în 5G

Scenariile de funcționare a serviciilor în sistemele de comunicații 5G sunt grupate în trei categorii principale:

- Comunicații ultra stabile cu întârziere mică [Ultra Reliable and Low Latency Communications (URLLC)];
- Comunicații de tip mașină [massive Machine-type communications (mMTC)];
- Comunicații de bandă largă [enhanced Mobile Broadband (eMBB)].

Serviciile eMBB sunt caracterizate de un debit de date ridicat, densitate mare de utilizatori, mobilitate și acoperire crescută.

Un alt set de cerințe pentru sistemele 5G îl au comunicații stabile, cu întârziere mică și localizare precisă, necesare asigurării serviciilor de siguranță publică cum sunt dirijarea și siguranța traficului rutier, sau consultațiilor medicale și diagnozei de la distanță.

Funcționarea comunicațiile mMTC aduce noi cerințe, cum ar fi o densitate mare de conexiuni, cu un debit de comunicație redus și intermitent.

Toate particularitățile scenariilor de comunicații anterioare se traduc într-o serie de cerințe tehnologice.

Undele milimetrice

Pentru a atinge niveluri de debit de ordinul Gbps per utilizator, noi benzi de frecvență, 30 - 300 GHz (numite benzi milimetrice sau mmWaves) sunt folosite, unde spectrul nu este încă utilizat.

Din cauza atenuării propagării de cale mult mai accentuate la aceste frecvențe, sistemele de antene cu un număr mare de elemente radiante sunt utilizate pentru a focaliza și dirija fascicolul radiant în diferite direcții (beamforming) și pentru a compensa astfel creșterea atenuării de cale.

În plus față de creșterea atenuării de cale, în benzile mmWaves o altă problemă o reprezintă interferența dintre sub-purtătoarele modulației Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM), cauzată de creșterea zgomotului de fază la frecvențe înalte. Soluția adoptată constă în utilizarea de semnale de referință suplimentare ca Tracking Reference Signals (TRS), sau în creșterea lățimii de bandă a sub-purtătoarelor, de la 15 kHz la 120 sau 240 kHz.

Numerologia variabilă

Spre deosebire de LTE, NR utilizează o modulație OFDM cu numerologie variabilă. Distanța dintre sub-purtătoarele OFDM nu mai este fixă, 15 kHz ca în LTE, ci poate ajunge până la 240 kHz. Pentru a satisface cerințele diverse ale serviciilor, diferite numerologii pot fi multiplexate în timp și frecvență, în același cadru.

Astfel, serviciile URLLC vor utiliza în benzile joase și medii o numerologie mai mare, pentru ca simbolurile utilizate să fie cât mai scurte, reducând astfel timpul de acces în rețea. Pe de altă parte, serviciile eMBB utilizează numerologii mai mici, având o durată de transmisie mai mare.

Antenele multiple

În afară de utilizarea canalelor de bandă largă, debitul de date poate fi îmbunătățit și prin multiplexarea spațială a fluxurilor de date emise de antenele multiple ale stației de bază, utilizând aceleași resurse timp-frecvență.

Pentru a compensa creșterea atenuării propagării de cale din benzile mmWaves prin beamforming, o arhitectură hibridă de beamforming digital-analog este propusă pentru sistemele MIMO în 5G. Se menține astfel posibilitatea multiplexării spațiale a fluxurilor de date, păstrând totodată un cost rezonabil al antenei.

Pentru precodarea MIMO (detaliată în această lucrare în Capitolul 4), numărul de lanțuri radio ale unui sistem de antene reprezintă numărul efectiv de antene virtuale disponibile, în timp ce numărul de elemente radiante asociat unui lanț radio, determină câștigul maxim ce poate fi obținut prin beamforming.

Massive MIMO

Sistemele de antene multiple Massive MIMO au fost propuse pentru a adresa creșterea masivă a capacității rețelelor 5G. Ele sunt sisteme de comunicații de tip MU-MIMO, unde numărul de antene la emisie este mai mare decât cel al utilizatorilor

deserviți și cu mult mai mare comparativ cu sistemele MIMO clasice, fiind capabile simultan de multiplexare spațială și beamforming [2].

În afara de creșterea puterii recepționate, avantajele folosirii Massive MIMO potrivit [3] sunt:

- Creșterea capacității legăturii radio de zeci de ori și a eficienței energiei radiate, de ordinul sutelor;
- Costul redus al componentelor radio de mică putere utilizate;
- Reducerea semnificativă a întârzierilor pe interfața radio. Sistemele Massive MIMO se bazează pe legea numerelor mari și pe beamforming pentru a evita condițiile de fading puternic, pentru ca acesta să nu mai influențeze astfel întârzierea;
- Simplificare tehnicii de acces multiplu. Cu OFDM, fiecare sub-purtătoare dintr-un sistem Massive MIMO ar putea avea același câștig al canalului, prin urmare fiecărui utilizator i se poate oferi întreaga bandă a sistemului, simplificând astfel semnalizarea resurselor de la nivelul fizic.

Factorii care limitează performanțele sistemelor Massive MIMO sunt:

- Complexitatea lanțurilor radio (formate din 100-200 de căi paralele) într-o configurație complet digitală;
- Mărimea interfeței analog-digitale (care ar trebui să proceseze un număr de 100-200 căi radio de emisie-recepție);
- Cantitatea de informații necesară estimării canalului radio (informații fără utilitate pentru utilizator);
- Complexitatea ridicată a procesării digitale de semnal
- Funcționarea doar în modul de duplexare temporală (TDD) pentru a utiliza reciprocitatea canalelor căii descendente [Downlink (DL)] - căii ascendente [Uplink (UL)] în estimarea canalului DL;
- Contaminarea semnalului pilot.

3 Elemente de teorie MIMO

Acest capitol descrie conceptele de bază necesare înțelegerii domeniului MIMO. Este introdusă modelarea canalului radio, împreună cu o metodă de corelație spațială și o modalitate de evaluare a separației spațiale dintre utilizatori.

3.1 Canalul MIMO

Matricea canalului unui sistem de antene MIMO cu N_R antene de recepție și N_T antene de transmisie este notată cu \mathbf{H} , $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N_R \times N_T}$. Tot un sistem MIMO este și arhitectura MU-MIMO, doar că în acest caz cele N_R antene sunt distribuite unor K utilizatori.

Notând cu \mathbf{x} setul de simboluri transmise independent pe cele N_T antene, x_1, x_2, \dots, x_{N_T} , $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{N_T \times 1}$, semnalul recepționat de cele N_R antene, $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^{N_R \times 1}$, poate fi rescris sub forma matriceală astfel:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (3.1)$$

unde $\mathbf{n} \sim \mathcal{N}_{\mathbb{C}}(\mathbf{0}_{N_R}, N_0 \mathbf{I}_{N_R})$ reprezintă zgomotul captat pe cele N_R antene de recepție cu densitate spectrală de putere, N_0 . Presupunem că acesta urmează o distribuție complexă Gaussiană, circular simetrică¹ cu medie zero.

Modelarea ideală de tip Rayleigh (din punct de vedere MIMO), presupune o decorrelare perfectă a semnalelor recepționate de cele K stații mobile, în care toate elementele matricei \mathbf{H} sunt variabile aleatoare complexe, distribuite Gaussian, $h_{ij} \sim \mathcal{N}_{\mathbb{C}}(0, 1)$.

3.2 Generarea corelației la emisie

Într-un context MU-MIMO, un vector aleator \mathbf{h}_k corelat spațial poate fi creat folosind transformarea Karhunen-Loeve[4]:

$$\mathbf{h}_k = \mathbf{R}_k \hat{\mathbf{e}}_k = \mathbf{U}_k \mathbf{D}_k^{\frac{1}{2}} \mathbf{U}_k^H \hat{\mathbf{e}}_k \sim \mathbf{U}_k \mathbf{D}_k^{\frac{1}{2}} \mathbf{e}_k, \quad (3.2)$$

unde $\hat{\mathbf{e}}_k \sim \mathcal{N}_{\mathbb{C}}(\mathbf{0}_{N_T}, \mathbf{I}_{N_T})$ și $\mathbf{e}_k \sim \mathcal{N}_{\mathbb{C}}(\mathbf{0}_r, \mathbf{I}_r)$. Descompunerea în valori proprii a matricei $\mathbf{R}_k \in \mathbb{C}^{N_T \times N_T}$ este $\mathbf{R}_k = \mathbf{U}_k \mathbf{D}_k \mathbf{U}_k^H$, unde $\mathbf{D}_k \in \mathbb{R}^{r \times r}$ este o matrice diagonală ce conține $r = \text{rang}(\mathbf{R}_k)$ valori proprii strict pozitive ale matricei \mathbf{R}_k , și $\mathbf{U}_k \in \mathbb{C}^{N_T \times r}$ conține vectorii proprii corespunzători. $\text{rang}(\cdot)$ este rangul unei matrici, sau numărul de valori proprii nenule. Ultima parte arată că distribuțiile lui \mathbf{h}_k și $\mathbf{U}_k \mathbf{D}_k^{\frac{1}{2}} \mathbf{e}_k$ sunt aceleași.

În [4] este propus un model de corelație spațială. Acesta presupune o distribuție Gaussiană a canalelor diferitelor elemente radiante, de medie zero, definite integral printr-o matrice de corelație \mathbf{R} . Elementele $r_{l,m}$ ale matricei \mathbf{R} se definesc ca:

$$\begin{aligned} r_{l,m} &= \sum_{n=1}^{N_p} \mathbb{E} \{ |g_n|^2 \} \mathbb{E} \{ e^{2\pi j d(l-1) \sin(\bar{\varphi})} e^{-2\pi j d(m-1) \sin(\bar{\varphi})} \} \\ &= \gamma \int e^{2\pi j d(l-m) \sin(\bar{\varphi})} f(\bar{\varphi}) d\bar{\varphi}. \end{aligned} \quad (3.3)$$

¹Spunem despre un vector \mathbf{n} că este circular simetric dacă $e^{j\theta} \mathbf{n}$ are aceeași distribuție ca și \mathbf{n} pentru orice θ .

În continuare, se presupune că propagarea pe căi multiple se datorează unui grup de obstacole situat în jurul utilizatorilor, iar stația de bază este situată deasupra obstacolelor, astfel încât propagarea în linie dreaptă nu este obturată în zona din apropierea ei. Se notează cu $\bar{\varphi} = \varphi + \delta$, unghiul fiecărui grup de obstacole, unde φ este unghiul nominal ce are o valoare deterministă. δ este o variabilă aleatoare având deviația standard față de unghiul nominal, σ_φ . Când δ este distribuit uniform, $\delta \sim U(-\sqrt{3}\sigma_\varphi, \sqrt{3}\sigma_\varphi)$, modelul de corelație se numește One Ring.

Pentru a reduce complexitatea simulărilor, o formă aproximativă poate fi folosită pentru $r_{l,m}$ când σ_θ este mică, iar δ urmează o distribuție Gaussiană $\delta \sim \mathcal{N}(0, \sigma_\varphi^2)$, $r_{l,m}(\varphi) = \gamma e^{2\pi j d(l-m) \sin(\varphi)} e^{-\frac{\sigma_\varphi^2}{2} [2\pi d(l-m) \cos(\varphi)]^2}$.

Alura matricei \mathbf{R} (sau \mathbf{R}_T) este reprezentată în Figura 3.1a și în Figura 3.1b, pentru tipul de corelație One Ring și Gaussian.

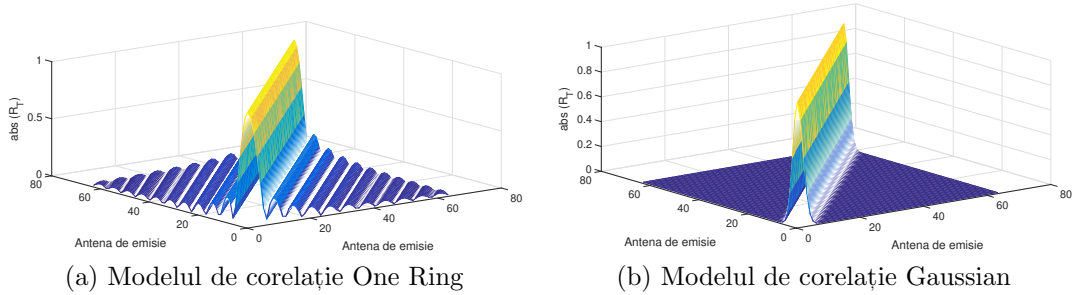


Figura 3.1: Alura matricei \mathbf{R}_T

3.3 Compatibilitatea spațială

Doi utilizatori sunt compatibili spațial atunci când canalele lor, \mathbf{h}_k , pot fi separate în spațiu prin tehnici de precodare liniară. O ecuație care estimează gradul de corelație a canalelor a doi utilizatori este descrisă în [4, 5]. Notând cu \mathbf{h}_i și \mathbf{h}_k canalele a doi utilizatori, inter-corelația acestora se poate scrie ca:

$$\cos(\angle(\mathbf{h}_i, \mathbf{h}_j)) \triangleq \mathbb{V} \left\{ \frac{\text{tr}[\mathbf{R}(\theta_i)\mathbf{R}(\theta_k)]}{N_T^2} \right\}, \quad (3.4)$$

unde $\cos(\angle(\mathbf{h}_i, \mathbf{h}_k)) \in [0, 1]$.

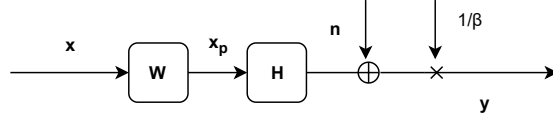
4 Algoritmi de precodare

În acest capitol sunt prezentate principalele tehnici de precodare utilizate în sistemele de comunicații MIMO. Rezultatele complexității de calcul și ale eficacității spectrale totale studiate în acest capitol au fost publicate în [6],[7] și [8].

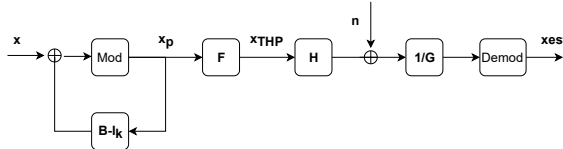
Precodarea liniară

Schemele de precodare liniară pentru MU-MIMO funcționează prin proiectarea semnalului util unui utilizator, într-un spațiu ortogonal celorlalți utilizatori [9], prin inversarea matricii canalului.

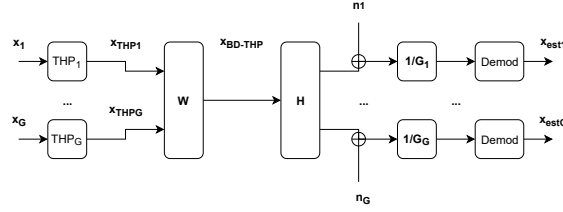
Schema bloc a unui precodator liniar este reprezentată în Figura 4.1a.



(a) Precodorul liniar



(b) Precodorul THP



(c) Precodorul hibrid BD-THP

Figura 4.1: Scheme bloc

Două dintre schemele de precodare liniară, Zero Forcing (ZF) și Regularized Zero Forcing (RZF), sunt reprezentate de matricile $\mathbf{W} \in \mathcal{C}^{N_T \times K}$, $\mathbf{W}_{ZF} = \beta \mathbf{H}^{-1}$ și $\mathbf{W}_{RZF} = \beta \mathbf{H} \mathbf{H}^H \left(\mathbf{H} \mathbf{H}^H + \frac{N_T N_0}{E_x} \mathbf{I} \right)^{-1}$, N_0 este densitatea spectrală de putere a zgomotului și E_x este energia semnalului emis, iar β are rolul de a normaliza semnalul precodat pentru a nu se depăși puterea totală transmisă.

Diagonalizarea în bloc a matricii canalului (BD), este o schemă de precodare liniară utilizată pentru utilizatorii cu antene de recepție multiple.

Precodarea neliniară

În timp ce mecanismele de precodare liniară au o complexitate computațională relativ redusă, eficacitatea lor spectrală este puternic afectată în scenarii unde există o densitate mare de utilizatori ce au canale puternic corelate. O alternativă a acestora sunt schemele de precodare neliniară ca Dirty Paper Coding (DPC) [10], Tomlinson Harashima Precoding (THP) și Vector Perturbation (VP).

Schema de precodare THP este ilustrată în Figura 4.1b. Matricea $\mathbf{B} = [b_{kl}]$ este o matrice unitară triunghiulară inferior, obținută prin descompunerea LQ a matricii canalului \mathbf{H} într-o matrice unitară $\mathbf{F} \in \mathcal{C}^{N_T \times K}$ și o matrice triunghiulară inferior

$\mathbf{L} \in C^{K \times K}$, $\mathbf{H} = \mathbf{L}\mathbf{F}^H$. Astfel, matricea canalului echivalent corespunzătoare schemei de precodare THP poate fi descrisă prin matricea triunghiulară inferior $\mathbf{B} = \mathbf{G} \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{F}$.

Pentru a preveni creșterea puterii totale în urma precodării cu \mathbf{B}^{-1} , o funcție modulo este utilizată la emisie. Operația modulo face ca simbolurile precodate să rămână în regiunea Voronoi a constelației originale. Într-o constelație de semnal ca M-Quadrature Amplitude Modulation (QAM), funcția modulo extinde periodic constelația, adăugând multipli de $2\sqrt{M}$ părților imaginare și reale ale lui x_k .

Precodarea hibridă

Pentru a reduce impactul erorilor de estimare a canalului și complexitatea precodării neliniare în sistemele cu multe antene de emisie, o schemă hibridă de precodare liniară-neliniară a fost propusă în [11, 12, 13, 14]. Într-o prima etapă, un precodor liniar este utilizat pentru a elimina interferența dintre grupuri de utilizatori cu canale decorelate, iar în a doua etapă, o schemă de precodare neliniară ca THP este utilizată pentru eliminarea interferenței dintre utilizatorii aceluiași grup. Figura 4.1c ilustrează schema de precodare hibridă Block Diagonalization - Tomlinson Harashima Precoding (BD-THP).

4.1 Rezultatele simulărilor

Evaluarea complexității de calcul

Complexitatea computațională poate fi evaluată prin numărul de operații cu numere reale în virgulă mobilă [Floating Point Operations (FLOPs)], necesare pentru înmulțirea și adunarea numerelor complexe. Complexitatea schemelor de precodare prezentate mai sus este rezumată în Tabelul 4.1 [12, 6], unde în cazul precodului hibrid se notează cu $K_g = K/G$ numărul de utilizatori din fiecare grup.

Tabelul 4.1: Complexitatea schemelor de precodare

Schema de precodare	Numărul de FLOPs
RZF	$4K^3 + 2KN_T(4K - 1) + K(4N_T - 1)(K + 1) + 2N_T(4K - 1) + 8K^2 + 7K$
THP	$16K^3/3 + 2K(4KN_T - K + 2) + 2T(2K + 2K^2 + N_T(4K - 1) - 4)$
BD-THP	$40GK_g^3/3 - 4GK_g^2 + 2GK_g - 2GK_gN_T + 16GK_g^2N_T + T(4GK_g^2 + 4GK_g + 8K_gN_T - 8G - 2N_T)$

Evaluarea eficacității spectrale

Se consideră legătura descendentă a unui sistem MU-MIMO cu o singură celulă. Stația de bază este echipată cu o antenă liniară ce conține N_T elemente radiante distribuite uniform, ce transmit simultan date către K utilizatori ce au o singură antenă de recepție. Câștigul canalului dintre fiecare utilizator și cele N_T antene de emisie urmează o distribuție Rayleigh corelată spațial.

Eficacitatea spectrală este evaluată în raport cu energia pe bit, E_b , raportată la densitatea spectrală de putere a zgomotului, N_0 , $E_b/N_0 \triangleq E_x/[KN_0 \log_2(M)]$, unde M este ordinul modulației QAM folosite. Pentru evaluarea performanței schemelor de precodare, simulări Monte Carlo au fost efectuate într-un sistem MU-MIMO cu $N_T = 16$ antene de emisie, $K = 16$ utilizatori și o schemă de modulație $M = 16$ -QAM.

Figura 4.2a evaluează performanța schemelor de precodare atunci când canalul este perfect estimat și cunoscut în totalitate stației de bază, iar Figura 4.2b atunci când estimatul canalului este incorect. Similar cu [13], eroarea de estimare introdusă poate fi modelată de un Zgomot Alb Gaussian Aditiv (ZAGA) de varianță 25 dB, ce corespunde unui utilizator ce se deplasează cu aproximativ 50 km/h, o frecvență purtătoare de 2 GHz și o durată de procesare de aproximativ 10 ms. În raport cu Figura 4.2a, se poate observa că BD-THP are performanțe mai scăzute decât restul schemelor de precodare, deoarece și BD și THP sunt afectate de eroarea de estimare.

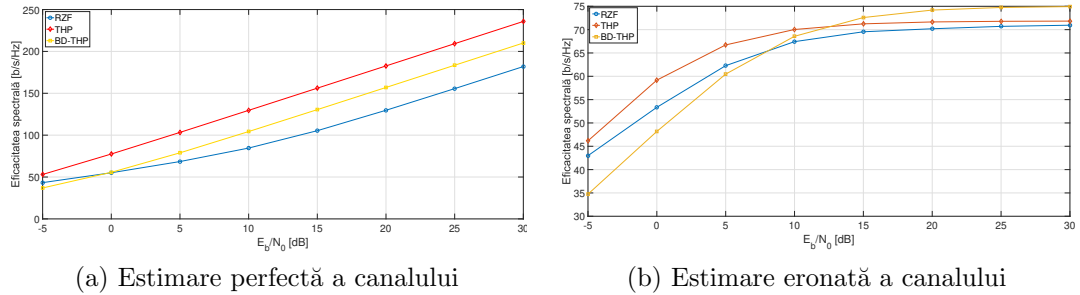


Figura 4.2: Eficacitatea spectrală în funcție de E_b/N_0

Figura 4.3a ilustrează eficacitatea spectrală a schemelor de precodare RZF și THP, în funcție de E_b/N_0 și de unghiul dintre utilizatori, când aceștia sunt separați cu un unghi egal, $\theta = \theta_{\min}$. Performanța ambelor scheme de precodare descrește pe măsură ce utilizatorii sunt mai apropiați unul de celălalt, dar schema de precodare THP are mereu performanțe mai bune decât schema de precodare RZF, datorită procedurii de anulare succesivă a interferenței.

Pentru a evalua eficacitatea spectrală a unei scheme de precodare hibridă, BD-THP, în Figura 4.3b se presupune că utilizatorii pot fi grupați în patru grupuri, fiecare localizat la un unghi $\theta_g = [-45^\circ, -15^\circ, 15^\circ, 45^\circ]$. Cum unghiul minim dintre oricare

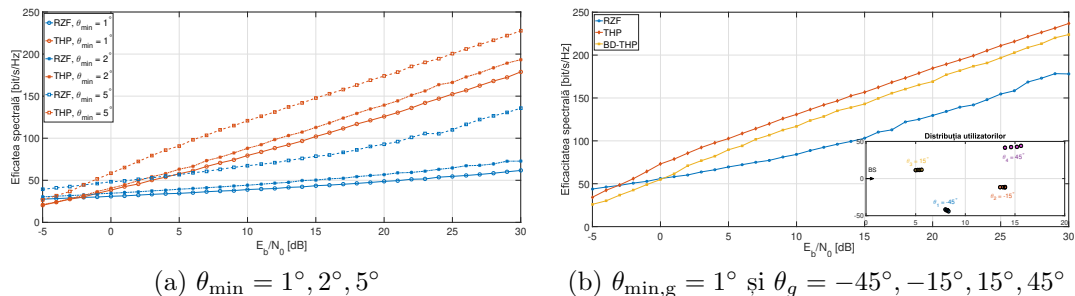


Figura 4.3: Eficacitatea spectrală în funcție de E_b/N_0 și θ_{\min}

două grupuri este de 30° și între oricare doi utilizatori din același grup este de 1° , se va utiliza o schemă de precodare liniară între grupuri și una neliniară în fiecare grup.

5 Gruparea utilizatorilor

În capitolul anterior s-a arătat că o schemă de precodare hibridă poate multiplexa spațial utilizatorii cu canale corelate prin tehnici de precodare neliniare, în timp ce utilizatorii ce pot fi separați spațial (cei cu canale decorelate), pot fi multiplexați prin tehnici de precodare liniare. În acest capitol este propus un algoritm de grupare ce separă utilizatorii în funcție de corelația spațială dintre ei. Rezultatele din acest capitol au fost publicate în [8] și [15].

5.1 Algoritmul K-Means

Pentru a optimiza performanța metodei de grupare, algoritmul statistic de grupare K-means [16] este propus, utilizând ca metrică de distanță, unghiurile dintre utilizatori. Algoritmul K-means organizează utilizatorii în N grupuri, astfel încât fiecare utilizator să aparțină grupului cu centrul cel mai apropiat (unghiul dintre utilizator și centrul grupului este minimizat).

Această metodă garantează că utilizatorii aceleiași grup sunt suficient de apropiați pentru a nu putea fi multiplexați spațial cu o schemă de precodare liniară. Pentru a determina dacă utilizatorii din două grupuri diferite pot fi multiplexați prin tehnici liniare, nu rămâne decât să verificăm unghiul dintre centrele grupurilor lor. Un set de grupuri ai căror utilizatori pot fi multiplexați spațial prin tehnici liniare, nu ar trebui să includă niciun grup ce formează cu celelalte grupuri din set un unghi mai mic ca $\Delta\theta$, unghiul minim sub care performanța schemei de precodare liniară este afectată.

5.2 Rezultatele simulărilor

Evaluarea algoritmului de grupare

Pentru un număr fix de grupuri și antene, algoritmul propus are o complexitate de ordinul $\mathcal{O}(K^{N+1} \times N)$ [17], mai redusă ca a schemei de precodare în două etape ce utilizează distanța cordală, care este de ordinul $\mathcal{O}[K^{N+1} \times N \times (N_T^2 + 2N_T^3)]$ [18].

Implementarea algoritmului K-means prin procedura lui Lloyd poate fi optimizată, obținând o complexitate liniară cu numărul de utilizatori și de grupuri, de ordinul $\mathcal{O}(KNI)$ [19]. Se poate arăta că numărul de iterații necesare convergenței descrește foarte mult atunci când utilizatorii au deja o distribuție spațială în clustere, cum este și cazul unei distribuții reale.

În Figura 5.1, utilizatorii sunt distribuiți în două scenarii de trafic, primul ce cuprinde traficul de dimineața și seara (numit Busy Hours), iar al doilea, în restul zilei (numit Working Hours). Datorită mobilității utilizatorilor, traficul de la Busy Hours este mai distribuit ca cel de la Working Hours, când este concentrat în anumite zone “fierbinți” (hotspots), cum sunt clădirile de birouri. Utilizând un unghi minim dintre doi utilizatori multiplexați spațial de $\Delta\theta = 30^\circ$, utilizatorii sunt distribuiți de algoritmul K-means în 4 grupuri în scenariul Working Hours și respectiv în 3 grupuri, în scenariul Busy Hours. Cele două distribuții de trafic au fost create într-un software de planificare radio, Planet [20], utilizând trase de apeluri localizate [21, 22].



(a) Distribuția și organizarea în grupuri a utilizatorilor la orele de muncă

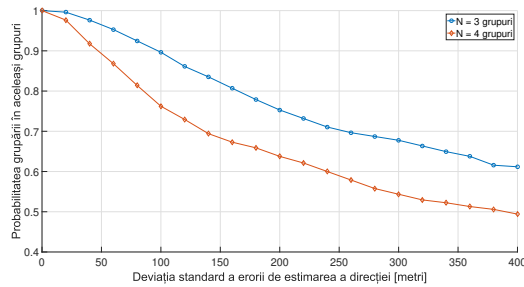
(b) Distribuția și organizarea în grupuri a utilizatorilor la orele vârf

Figura 5.1: Rezultatele grupării pentru sectorul B2 și $\Delta\theta = 30^\circ$

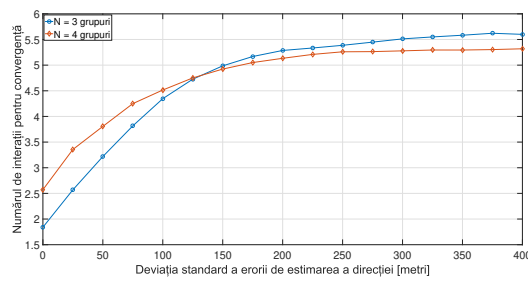
În realitate, direcția utilizatorilor nu este mereu estimată perfect. Din acest motiv, în Figura 5.2 am studiat impactul erorii de estimare a direcției utilizatorilor asupra performanței algoritmului de grupare.

Evaluarea eficacității spectrale a schemei de precodare

Scenariul evaluat este reprezentat în Figura 5.3a. Se poate observa că gruparea utilizatorilor necesită doar cunoașterea direcțiilor utilizatorilor, și nu a stării canalului, reducând astfel cantitatea de informație necesară estimării și raportării stării canalului. Odată grupați, un set de utilizatori este selectat din fiecare grup pentru a fi precodat de un bloc THP. Grupurile de utilizatori selectați și multiplexați prin THP, sunt apoi precodate prin schema liniară BD. Pentru calculul ponderilor de precodare, doar schemele de precodare folosite, BD și THP, necesită o cunoaștere



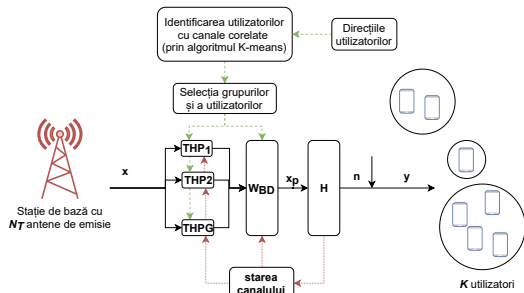
(a) Probabilitatea organizării utilizatorilor în aceeași grupuri



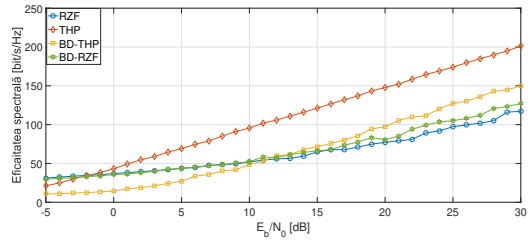
(b) Numărul de iterații necesare convergenței

Figura 5.2: Performanța algoritmului de grupare în funcție de deviația standard a erorii de estimare a direcției

perfectă a canalului utilizatorilor selectați de algoritmul de grupare, și nu a întregului set de utilizatori.



(a) Ilustrarea schemei de precodare hibridă, utilizată împreună cu algoritmul de grupare



(b) Eficacitate spectrală a schemelor de precodare pentru organizarea în grupuri a utilizatorilor la orele de muncă

Figura 5.3: Studiul performanței schemei de precodare hibridă

Pentru a evalua eficacitatea spectrală (capacitatea) a unei scheme de precodare hibridă, în Figura 5.3b se consideră că utilizatorii sunt repartizați după distribuția Busy Hours. În comparație cu schemele de precodare THP și RZF, schema de precodare hibridă urmează aceeași tendință ca și THP, performanța fiind mai redusă din cauza performanței inferioare a schemei de precodare liniară BD. Noile rezultate ale schemei de precodare hibridă fiind similare cu cele din secțiunea anterioară, unde utilizatorii erau deja organizați în grupuri decorelate, demonstrează că algoritmul de

grupare propus organizează utilizatorii în vederea optimizării performanței schemei de precodare.

6 Localizarea și distribuția spațială a apelurilor în rețelele mobile

În rețelele de telecomunicații, trase conținând informații raportate de echipamentele mobile în timpul apelurilor, sunt colectate automat de stațiile de bază în vederea investigării diferitelor evenimente ce pot apărea în rețea și a îmbunătățirii performanței acestora. În acest capitol este prezentată o tehnică de localizare în 3D a apelurilor LTE, pe baza predicției propagării semnalelor radio și este prezentată o metodă de a utiliza apelurile localizate pentru generarea hărților distribuției spațiale a traficului. Rezultatele din acest capitol au fost publicate în [21] și [22].

6.1 Implementarea algoritmului de localizare în 3D

Principala contribuție a acestui capitol este implementarea unui algoritm îmbunătățit de localizare a apelurilor LTE în trei dimensiuni, în interiorul și exteriorul clădirilor, folosind informații despre configurația rețelei radio și măsurătorile LTE raportate. Notând cu \mathbf{Loc} , mulțimea de locații 3D posibile, probabilitatea ca un apel LTE să fie localizat în poziția $\mathbf{Loc}_i = (X_i, Y_i, Z_i)$ când setul de măsurători raportat este \mathbf{M} , se definește ca:

$$P(\mathbf{Loc}_i|\mathbf{M}) = P(\mathbf{Loc}_i|\mathbf{S}) \times P(\mathbf{Loc}_i|CellID) \times P(\mathbf{Loc}_i|TA), \quad (6.1)$$

unde \mathbf{S} este setul de măsurători RSRP raportat pentru un număr de $N \geq 1$ celule, TA este valoarea întârzierii măsurată față de celula primară [Timing Advance (TA)], iar $CellID$ este identificatorul unic al celulei primare.

Probabilitatea locației condiționată de celula primară raportată, $P(\mathbf{Loc}_i|CellID)$, filtrează locațiile unde aceasta nu poate fi utilizată (unde acoperirea nu este suficientă).

$P(\mathbf{Loc}_i|TA)$ filtrează locațiile care sunt prea aproape sau prea departe de locația celulei ce servește apelul utilizatorului, utilizând valoarea raportată în măsurători pentru TA.

Pentru a putea localiza efectiv un apel, este utilizat un filtru pe baza amprentei puterii semnalelor radio măsurate, presupunând că toate măsurătorile RSRP sunt mutual independente și că erorile dintre predicții și măsurători au o distribuție Gaussiană.

$$P(\mathbf{S}|\mathbf{Loc}_i) = \left\{ e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(s_1^M - s_1^P)^2} \left[\prod_{j=2}^N e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(\Delta s_j^M - \Delta s_j^P)^2} \right] \right\}^{\frac{1}{N}}. \quad (6.2)$$

unde s_j^M și s_j^P sunt valorile RSRP măsurate (prezente în trase) și respectiv estimate cu ajutorul modelului de propagare pentru celula j , N este numărul de valori RSRP raportate, iar σ este parametrul care modelează posibilele variații ale valorilor măsurate față de cele estimate, datorate fading-ului sau erorilor de măsurare, și $\Delta s_j^{M(P)} = s_1^{M(P)} - s_j^{M(P)}$.

Pentru calculul locației cele mai probabile, $\widehat{\mathbf{Loc}}$, următoarele variante sunt posibile:

- Locația cu probabilitate maximă: $\widehat{\mathbf{Loc}} = \arg \max_{\mathbf{Loc}_i \in \mathbf{Loc}_s} P(\mathbf{Loc}_i | \mathbf{M})$;
- Locația care minimizeze eroarea medie de localizare: $\widehat{\mathbf{Loc}} = \frac{\sum_i \mathbf{Loc}_i \times P(\mathbf{Loc}_i | \mathbf{S})}{\sum_i P(\mathbf{Loc}_i | \mathbf{S})}$.

6.2 Crearea bazei de date de măsurători

În această secțiune este descrisă o procedură de generare a traselor de apeluri cu măsurători realiste și coordonate 3D valide, utilizate pentru validarea performanței algoritmului de localizare în 3D.

Etapile parcurse pentru generarea măsurătorilor pe baza valorilor semnalelor radio estimate, sunt rezumate astfel:

- Se pornește de la valorile RSRP estimate pentru un număr de celule într-o locație aleatoare, la care se adaugă un zgomot ce modelează efectele fading-ului.
- Fading-ul este corelat între locații și între celulele învecinate. Distanțele peste care fading-ul este decorelat sunt de 7 metri la interior și de 30 de metri la exterior.

6.3 Generarea distribuției traficului

O altă contribuție a acestui capitol o reprezintă metoda de generare a hărților de distribuție a traficului, utilizând valorile probabilităților locațiilor calculate de algoritmul de localizare și cantitatea de trafic transportată în fiecare apel t_c :

$$T_{\mathbf{Loc}_i} = \frac{\sum_c t_c \times P(\mathbf{Loc}_i | \mathbf{S}_c)}{\sum_c P(\mathbf{Loc}_i | \mathbf{S}_c)}. \quad (6.3)$$

Spre deosebire de metodele existente, metoda propusă nu necesită determinarea cu precizie a locației fiecărui apel.

6.4 Rezultatele simulărilor

Performanța algoritmului de localizare 3D propus este evaluată utilizând apeluri LTE generate în zona din jurul gării Tokyo. Precizia, Err , este obținută prin calcularea distanței Euclidiene dintre coordonatele reale în 3D (X_c, Y_c, Z_c) și cele estimate ($\widehat{X}_c, \widehat{Y}_c, \widehat{Z}_c$):

$$Errr = \sqrt{(X_c - \widehat{X}_c)^2 + (Y_c - \widehat{Y}_c)^2 + (Z_c - \widehat{Z}_c)^2}. \quad (6.4)$$

În Figura 6.1a se poate observa că 95% dintre apeluri sunt localizate cu o precizie de 140 de metri, iar media erorii de localizare este de 45 de metri.

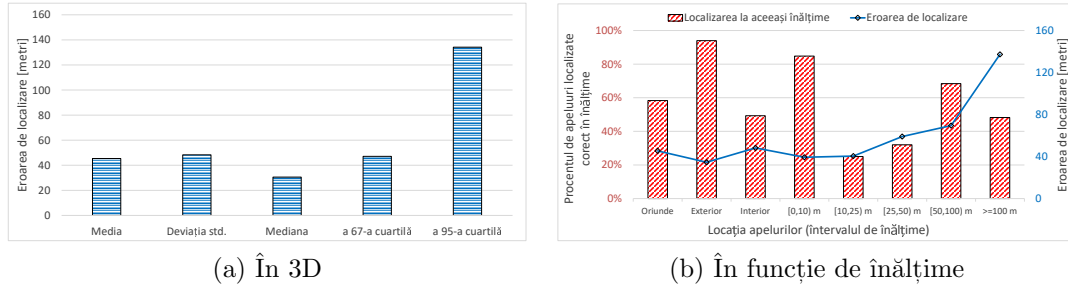


Figura 6.1: Performanța algoritmului de localizare

În Figura 6.1b se poate observa că eroarea medie de localizare crește cu înălțimea apelurilor. Acest lucru se datorează performanței algoritmului de localizare prin amprenta radio, care este mai scăzută la înălțimi mai mari și a similitudinii valorilor RSRP prezise la acele înălțimi.

Performanța metodei de generare a distribuției traficului este studiată utilizând algoritmul de localizare pe o listă de 208203 de măsurători efectuate celor 134 de celule. O analiză vizuală a celor două metode indică o mai bună acuratețe a metodei propuse deoarece:

- Contururile clădirilor sunt bine evidențiate în Figura 6.3a și se potrivesc cu profilul clădirilor văzute din satelit (Figura 6.2a). În Figura 6.2, nu se pot distinge contururile clădirilor;
- Zona extrem de aglomerată din jurul gării Tokyo poate fi distinsă cu ușurință, spre deosebire de distribuțiile traficului din Figura 6.2b, Figura 6.2c și Figura 6.2d, care indică doar o densitate mai mare a traficului în acea zonă.

7 Simularea și calibrarea algoritmului de ordonare a utilizatorilor

În acest capitol este prezentat un algoritm care selectează și ordonează utilizatorii în funcție de tipul serviciului, calitatea canalului și debitul de date acumulat. Domeniul ordonării nu este deloc standardizat, iar tehnicile utilizate reprezintă secrete industriale, prin urmare algoritmul este conceput pentru a fi configurabil, putând

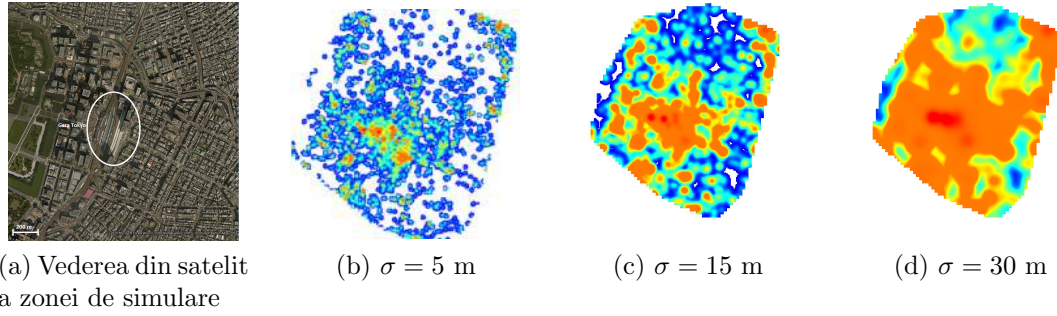


Figura 6.2: Generarea distribuției traficului utilizând metoda standard, o împrăștiere Gaussiană în jurul locațiilor estimate

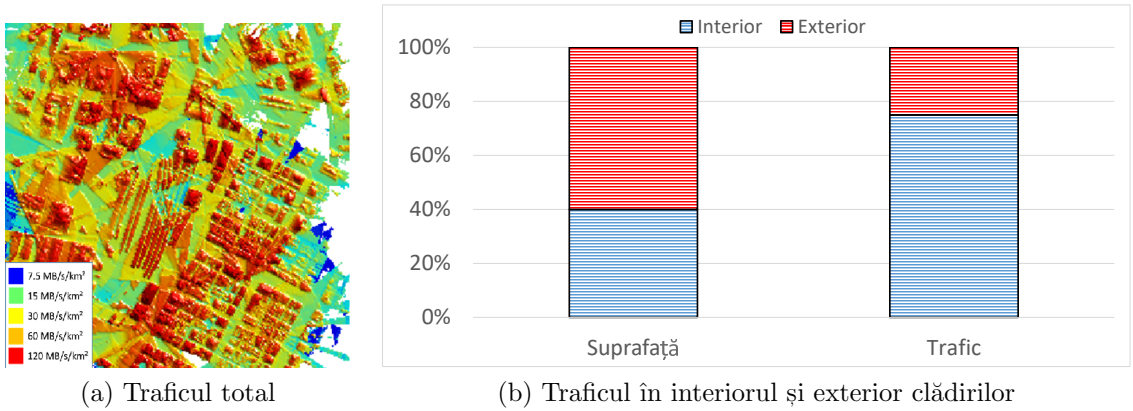


Figura 6.3: Distribuția traficului utilizând metoda propusă

fi calibrat oricărei implementări dintr-o stație de bază reală. Rezultatele din acest capitol au fost publicate în [23] și brevetate în [24].

O prezentare a tehnicilor de ordonare este făcută în [25]. În categoria celor care țin cont de starea canalului și de calitatea serviciului [Quality of Service (QoS)] întâlnim tehnicile de ordonare care funcționează în domeniul temporal [Time Domain (TD)] și în domeniul frecvență [Frequency Domain (FD)]. Performanța metodei de ordonare în două etape TD/FD este studiată și de autorii din [26] și [27]. Pentru satisfacerea cerințelor de QoS, autorii din [28, 29, 30] și cei din studiile mai recente [31], propun diferite metrice pentru algoritmi de ordonare TD și FD.

7.1 Modelarea algoritmului de ordonare

Pentru simularea comportamentului unui algoritm de ordonare a utilizatorilor, a fost concepută o metodă de modelare a diferitelor tipuri de trafic. Aceasta estimează lungimea cozii de așteptare a pachetelor și întârzierea primului pachet în fiecare moment de timp în care o transmisiune este posibilă, în funcție de debitul de date mediu și de perioada pachetelor. Traficul utilizatorilor cu un debit de date garantat [Guar-

anteed Bit Rate (GBR)] este periodic. Traficul utilizatorilor fără un debit de date minim garantat (non GBR) este aleator [explozie de trafic (burst)].

Calitatea canalului este calculată prin raportul semnal-zgomot și interferență (RSZI). Se presupune de asemenea că interferența este proporțională cu procentul de blocuri de resurse [Physical Resource Blocks (PRBs)] utilizate, sau utilizarea fiecărei celule. Valorile fading-ului rapid și al celui selectiv în frecvență sunt generate în funcție de tipul de canal și de mobilitatea utilizatorilor.

La un moment dat, coada de așteptare conține pachete de date noi sau pachete de date care nu au fost corect recepționate de utilizatori. Probabilitatea de recepție corectă a unui pachet este calculată în funcție de raportul semnal-zgomot și interferență și de schema de modulație utilizată.

Versiunea TD-FD a fost aleasă pentru a asigura flexibilitate modelului de ordonare. Ea permite algoritmului să ordoneze utilizatorii mai întâi în timp, urmând a aloca apoi resursele de frecvență. Schema modelului implementat este prezentată în Figura 7.1a.

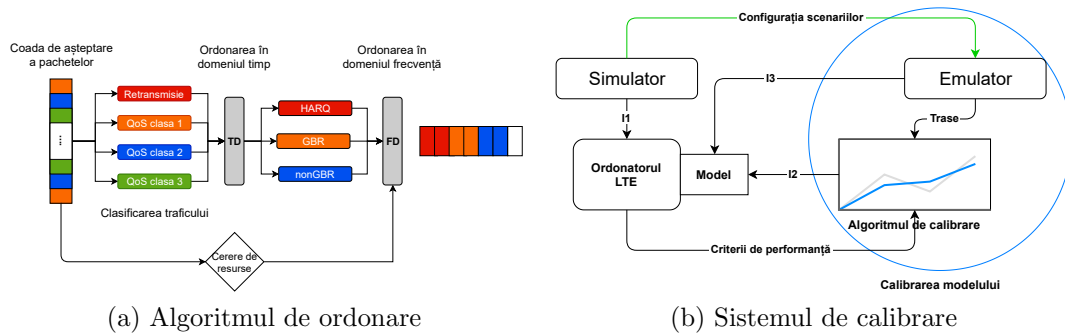


Figura 7.1: Schema bloc a sistemului

În TD, metrica de ordonare definită este capabilă de a se adapta diferitelor modele de QoS, ordonând utilizatorii în funcție de lungimea cozii de așteptare, debitul de date minim garantat, debitul de date acumulat, calitatea canalului și prioritatea serviciului. Fiecare dintre acești parametri este ponderat prin diferite valori configurabile w . În FD, algoritmul de ordonare prioritizează mai întâi alocarea resurselor pentru retransmisiuni, apoi pentru utilizatorii GBR, iar la sfârșit, resursele neutilizate sunt alocate utilizatorilor non GBR.

Toți parametrii care modelează comportamentul ordonatorului, cum ar fi valorile ponderilor, numărul maxim de blocuri de resurse disponibile pentru utilizatorii GBR, strategia altruistă sau egoistă, au rolul de a permite modelul de ordonare de a se calibra diferitelor implementări din stațiile de bază.

7.2 Rezultatele simulărilor

Performanța diferitelor strategii de ordonare este evaluată din punct de vedere al debitului total de date alocat și al indicelui de echitate al debitului [Rate Fairness Index (RFI)], folosind ecuația propusă de Jain în [32].

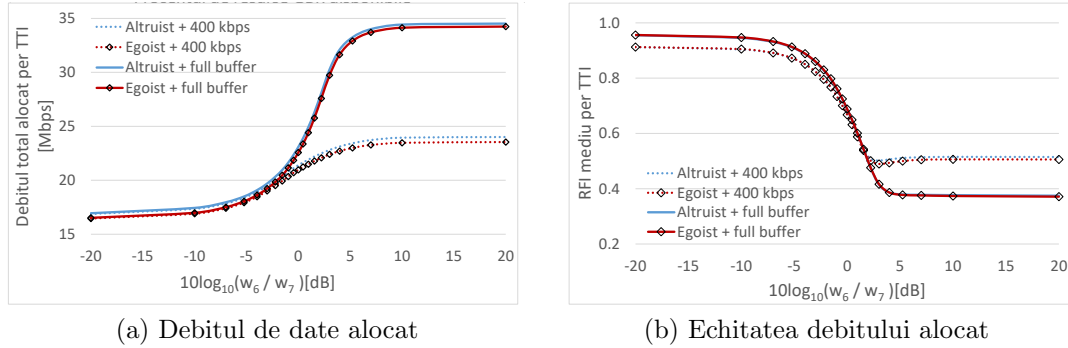


Figura 7.2: Performanța serviciilor non GBR în funcție de raportul ponderii calității canalului pe debitul de date acumulat, w_6/w_7

În Figura 7.2a și Figura 7.2b, când $10 \log_{10} \left(\frac{w_6}{w_7} \right) = -20$ dB, ordonatorul servește mai întâi utilizatorii cu cel mai mic debit de date acumulat, indiferent de calitatea canalului lor. Când $10 \log_{10} \left(\frac{w_6}{w_7} \right) = 20$ dB, debitul de date total este maximizat cu prețul de a avea un RFI foarte mic.

Dat fiind setul de parametri ai modelului de ordonare menționat anterior, pentru calibrarea modelului de ordonare este propusă arhitectura din Figura 7.1b. Simulatorul furnizează ordonatorului LTE și emulatorului de echipamente mobile prin interfața I1, informații despre numărul de utilizatori, câștigul canalelor, durata unui scenariu, tipul de trafic modelat prin mărimea pachetelor și perioada lor, etc. Pe baza scenariilor de test, emulatorul transmite ordonatorului prin interfața I3 valorile procentajului de resurse disponibile alocate utilizatorilor GBR, numărului maxim de utilizatori non GBR serviți într-un mod echitabil, etc.

Algoritmul de calibrare este responsabil de crearea listei de parametri I2, obținută prin simularea algoritmului de ordonare pentru diferite valori ale ponderilor w . Valoarea optimă a ponderilor ce minimizează diferența dintre simulare și implementare, este găsită cu ajutorul unei metode bazate pe principiul de căutare binară.

8 Concluzii

8.1 Rezultate obținute

În primul capitol a fost făcută o introducere în domeniul sistemelor de antene multiple MIMO utilizate în rețelele celulare și a fost prezentat scopul tezei. În Capitolul 2 a fost făcută o prezentare a sistemelor celulare din generația a 5-a și au fost

prezentate tehnicile de utilizare a antenelor multiple. În Capitolul 3 a fost introdus modelul de corelație spațială și temporală a canalului radio, precum și o modalitate de a estimare a separației spațiale dintre utilizatori. În Capitolul 4 au fost studiate principalele tehnici de precodare, care au fost apoi clasificate din punct de vedere al eficacității spectrale (capacității) și al complexității de calcul. În Capitolul 5 utilizatorii ce au o distribuție reală, au fost grupați în funcție de corelația spațială dintre ei. În Capitolul 6 a fost prezentată o metodă de generare a distribuției spațiale a utilizatorilor pe baza unui algoritm de localizare în 3D a apelurilor LTE. În Capitolul 7 a fost prezentată o metodă de ordonare și selecție a utilizatorilor prin definirea unui ordonator configurabil.

8.2 Contribuții originale și lucrările publicate

În această secțiune sunt prezentate principalele contribuții originale ale lucrării, asociate cu articolele în care au fost publicate.

Contribuții originale

- (1) Sintetizarea specificațiilor 5G NR pe baza documentelor grupului 3GPP RAN, înainte de publicarea lor oficială în standard.
- (2), (3) Dezvoltarea unui sistem de testare a performanțelor schemelor de precodare liniare, neliniare și hibride, a unui model de canal corelat spațial parametrizabil prin unghiul dintre direcțiile utilizatorilor și a unei metode de determinare a separației spațiale dintre utilizatori.
- (4), (5) Dezvoltarea unui algoritm de complexitate redusă pentru gruparea utilizatorilor pe baza separației spațiale și adaptarea schemei de funcționare hibridă pe baza algoritmului de grupare propus.
- (6), (7) Contribuții la dezvoltarea unui algoritm de localizare în 3D a apelurilor cu scopul testării algoritmului de grupare și a schemelor de precodare, utilizând o distribuție a traficului cât mai realistă.
- (8) Contribuții la dezvoltarea unui ordonator adaptiv precum și a unei metode de evaluare a măsurătorilor stațiilor mobile, pentru identificarea comportamentului unei stații de bază reale.

Publicații

- (1) R.-F. Trifan, A.-A. Enescu, și C. Paleologu, *Preview on MIMO Systems in 5G New Radio*, FABULOUS Proceedings, pp. 32-38, octombrie 2017. [[ISI Proceedings](#)]
- (2) R.-F. Trifan și C. Paleologu, *MU-MIMO Precoding Performance Conditioned by Inter-user Angular Separation*, ISETC Proceedings, pp. 1-4, noiembrie 2018. [[ISI Proceedings](#)]

- (3) R.-F. Trifan și A.-A. Enescu, *Non-Linear Precoding Performance in Spatio-Temporally Correlated MU-MIMO Channels*, COMM Proceedings, pp. 181-186, mai 2018. [ISI Proceedings]
- (4) R.-F. Trifan, R. Lerbour, G. Donnard, și Y. L. Helloco, *K-Means MU-MIMO User Clustering for Optimized Precoding Performance*, VTC Proceedings, pp. 1-5, iunie 2019. [ISI Proceedings]
- (5) R.-F. Trifan, A.-A. Enescu, și C. Paleologu, *Hybrid MU-MIMO Precoding Based on K-Means User Clustering*, Algorithms, vol. 12, pp. 1-18, iulie 2019. [ISI-Q3, FI 1,510]
- (6) R.-F. Trifan, *Hybrid MU-MIMO Precoding Based on K-Means User Clustering*, SAD - ETTI, iulie 2019.
- (7) R.-F. Trifan, R. Lerbour, și Y. L. Helloco, *Enhanced 3D Geolocation Algorithm for LTE Call Traces*, VTC Proceedings, pp. 1-5, septembrie 2016. [ISI Proceedings]
- (8) R. Lerbour, Y. L. Helloco, și R.-F. Trifan, *Hotspot Identification through Call Trace Analysis*, VTC Proceedings, pp. 1-5, septembrie 2016. [ISI Proceedings]
- (9) R. Lerbour și R.-F. Trifan, *Devices and Method for Simulating a Mobile Telecommunications Network - EP3526932A1*, European Patent Office, octombrie 2016. [Brevet de invenție]
- (10) R.-F. Trifan, R. Lerbour, și Y. L. Helloco, *Mirroring LTE Scheduler Performance with an Adaptive Simulation Model*, VTC Proceedings, pp. 1-5, mai 2015. [ISI Proceedings]

8.3 Perspective de dezvoltare ulterioară

O primă direcție de dezvoltare ulterioară o poate constitui integrarea modelului de beamforming și de dirijare a fascicolului, în modelarea canalului MIMO. O altă direcție de dezvoltare ar putea fi utilizarea algoritmilor de inteligență artificială pentru crearea unei scheme de precodare universală, care să optimizeze unul sau mai multe criterii de performanță, în diverse condiții ale canalului radio, de trafic și de distribuție a utilizatorilor. Totodată, algoritmi propuși ar trebui în final implementați pe o arhitectură hardware (embedded) pentru o validare a funcționării lor în timp real.

Bibliografie

- [1] R.-F. Trifan, A.-A. Enescu, and C. Paleologu, "Preview on MIMO Systems in 5G New Radio," *FABULOUS Proceedings*, pp. 32–38, iulie 2017.
- [2] T. Chien and E. Björnson, "Massive MIMO Communications," *5G Mobile Communications*, pp. 77–116, 2017.
- [3] E. Björnson, J. Hoydis, and L. Sanguinetti, "Massive MIMO has Unlimited Capacity," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, pp. 574–590, ianuarie 2018.
- [4] E. Björnson, J. Hoydis, and L. Sanguinetti, "Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency," *Foundations and Trends in Signal Processing*, vol. 11, pp. 154–655, noiembrie 2017.
- [5] M. Herdin, N. Czink, H. Ozelik, and E. Bonek, "Correlation Matrix Distance, a Meaningful Measure for Evaluation of Non-Stationary MIMO Channels," *VTC Proceedings*, pp. 136–140, decembrie 2005.
- [6] R.-F. Trifan and C. Paleologu, "Non-Linear Precoding Performance in Spatio-Temporally Correlated MU-MIMO Channels," *COMM Proceedings*, pp. 181–186, mai 2018.
- [7] R.-F. Trifan and A.-A. Enescu, "MU-MIMO Precoding Performance Conditioned by Inter-user Angular Separation," *ISETC Proceedings*, pp. 1–4, noiembrie 2018.
- [8] R.-F. Trifan, A.-A. Enescu, and C. Paleologu, "Hybrid MU-MIMO Precoding Based on K-Means User Clustering," *Algorithms*, vol. 12, pp. 1–18, iulie 2019.
- [9] E. Castaneda, A. Silva, A. Gameiro, and M. Kountouris, "An Overview on Resource Allocation Techniques for MU-MIMO Systems," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, pp. 239–284, martie 2016.
- [10] M. Costa, "Writing on Dirty Paper," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 29, pp. 439–441, mai 1983.
- [11] F. Hasegawa, H. Nishimoto, N. Song, M. Enescu, A. Taira, A. Okazaki, and A. Okamura, "Non-Linear Precoding for 5G NR," *CSCN Proceedings*, pp. 1–7, octombrie 2018.
- [12] S. Zarei, W. Gerstacker, and R. Schober, "Low Complexity Hybrid Linear/Tomlinson-Harashima Precoding for Downlink Large-Scale MU-MIMO Systems," *Globecom Proceedings*, pp. 1–7, decembrie 2016.
- [13] M. Electric, "MU-MIMO Performance Evaluation of Nonlinear Precoding Schemes," *Raportul întâlnirii 3GPP TSG RAN WG1 88b*, pp. 1–5, aprilie 2017.
- [14] Huawei and HiSilicon, "Non-linear Precoding for Downlink MU-MIMO," *Raportul întâlnirii 3GPP TSG RAN WG1 88*, pp. 1–5, februarie 2017.
- [15] R.-F. Trifan, R. Lerbour, G. Donnard, and Y. L. Helloco, "K-Means MU-MIMO User Clustering for Optimized Precoding Performance," *VTC Proceedings*, pp. 1–5, iunie 2019.
- [16] S. Lloyd, "Least squares quantization in PCM," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 28, pp. 129–137, martie 1982.
- [17] M. Inaba, N. Katoh, and H. Imai, "Applications of Weighted Voronoi Diagrams and Randomization to Variance-based K-clustering," *10th ACM Symposium on Computational Geometry Proceedings*, p. 332–339, iunie 1994.
- [18] Y. Xu, G. Yue, and S. Mao, "User Grouping for Massive MIMO in FDD Systems: New Design Methods and Analysis," *IEEE Access*, vol. 2, pp. 947–959, august 2014.

- [19] G. Hamerly, "Making K-means Even Faster," *SIAM International Conference on Data Mining Proceedings*, pp. 130–140, mai 2010.
- [20] InfoVista, "Planet, software de planing radio." <https://www.infovista.com/planet/rf-planning-software>. [acesat pe 08 Mai 2020].
- [21] R. Lerbour, Y. L. Helloco, and R.-F. Trifan, "Hotspot Identification through Call Trace Analysis," *VTC Proceedings*, pp. 1–5, septembrie 2016.
- [22] R.-F. Trifan, R. Lerbour, and Y. L. Helloco, "Enhanced 3D Geolocation Algorithm for LTE Call Traces," *VTC Proceedings*, pp. 1–5, septembrie 2016.
- [23] R.-F. Trifan, R. Lerbour, and Y. L. Helloco, "Mirroring LTE Scheduler Performance with an Adaptive Simulation Model," *VTC Proceedings*, pp. 1–5, mai 2015.
- [24] R.-F. Trifan and R. Lerbour, "Devices and Method for Simulating a Mobile Telecommunications Network - EP3526932A1," *European Patent Office*, octombrie 2016.
- [25] T. K. Ramesh, "A Survey on Scheduling Algorithms for Downlink in LTE Cellular Network," *2019 International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)*, pp. 219–223, februarie 2019.
- [26] D. Martin-Sacristan, J. F. Monserrat, D. Calabuig, and N. Cardona, "Time-Frequency Coupled Proportional Fair Scheduler with Multicarrier Awareness for LTE Downlink," *VTC Proceeding*, pp. 1–5, iulie 2015.
- [27] O. Grøndalen, A. Zanella, K. Mahmood, M. Carpin, J. Rasool, and O. N. Østerbø, "Scheduling Policies in Time and Frequency Domains for LTE Downlink Channel: A Performance Comparison," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, pp. 3345–3360, aprilie 2017.
- [28] W. Fu, Qingliang, W. Tian, C. Wang, and L. Ma, "A QoS Aware Scheduling Algorithm Based on Service Type for LTE Downlink," *VTC Proceedings*, pp. 2468–2473, martie 2013.
- [29] B. Bojovic and N. Baldo, "A New Channel and QoS Aware Scheduler to Enhance the Capacity of Voice Over LTE Systems," *SSD Proceedings*, pp. 1–6, februarie 2014.
- [30] Y. Zaki, T. Weerawardane, C. Gorg, and A. Timm-Giel, "Multi-QoS aware Fair Scheduling for LTE," *VTC Proceedings*, pp. 1–5, mai 2011.
- [31] M. M. Nasralla and I. U. Rehman, "QCI and QoS Aware Downlink Packet Scheduling Algorithms for Multi-Traffic Classes over 4G and beyond Wireless Networks," *3ICT Proceedings*, pp. 1–7, noiembrie 2018.
- [32] R. Jain, D. Chiu, and W. Have, "A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Computer Systems," *DEC Research Report*, pp. 1–37, septembrie 1984.