



**Universitatea  
Transilvania  
din Brașov**

**Școala Doctorală Interdisciplinară  
Facultatea de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor  
Departamentul de Electronică și Calculatoare**

**Radu CURPEN**

**Contribuții la Optimizarea Rețelei de Acces  
în Comunicații Mobile**

**Contributions to the Access Network Optimization  
in Mobile Communications**

**REZUMAT / ABSTRACT**

**Conducător științific  
Prof.dr.ing. Florin SANDU  
BRASOV, 2020**

D-lui (D-nei)

.....

**COMPONENȚA**  
**Comisiei de doctorat**

Numită prin ordinul Rectorului Universității Transilvania din Brașov

Nr. 10618 din 10 iulie 2020

PREȘEDINTE: Prof.dr.ing. Mihai IVANOVICI - Universitatea "Transilvania" din Brașov  
CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC: Prof.dr.ing. Florin SANDU - Universitatea "Transilvania" din Brașov  
REFERENȚI: Prof.dr.ing. Paul BECHET – Academia Forțelor Terestre "Nicolae Bălcescu" - Sibiu  
Prof.dr.ing. Tudor PALADE - Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca  
Prof.dr.ing. Petre OGRUȚAN - Universitatea "Transilvania" din Brașov

Data, ora și locul susținerii publice a tezei de doctorat:

Data 19 Septembrie 2020, ora 9, online

Eventualele aprecieri sau observații asupra conținutului lucrării vă rugăm să le transmiteți în timp util, pe adresa [radu.curpen@unitbv.ro](mailto:radu.curpen@unitbv.ro)

Totodată vă invităm să luați parte la ședința publică de susținere a tezei de doctorat.

Vă mulțumim.

# Cuprins

Pag. Rezumat Pag. Teză

Introducere.....	5	10
Oportunitatea tezei de doctorat.....	5	10
Obiectivele tezei de doctorat.....	6	11
Organizarea tezei de doctorat.....	7	13
Baza experimentală.....	8	14
1. Contextul tehnologic actual. Stadiul cercetărilor în domeniul tezei.....	10	16
1.1. Comunicațiile mobile LTE.....	10	16
1.1.1. LTE <i>Release 8</i> .....	10	16
1.1.2. <i>IMT-Advanced</i> .....	10	18
1.1.3. LTE <i>Release 10 (LTE-Advanced)</i> .....	11	18
1.1.4. <i>Release 11 si 12</i> .....	13	27
1.1.5. Mobilitatea IP împreună cu echilibrare în WLAN – IFOM.....	14	32
1.2. Caracteristicile rețelei de acces LTE.....	15	34
1.2.1. Benzi de frecvență.....	15	34
1.2.2. Arhitectura rețelei LTE.....	15	34
1.2.3. Rolul eNodeB.....	16	38
1.2.4. Interfețele LTE.....	18	38
1.2.5. E-UTRAN si E-UTRA.....	18	44
1.3. Sumarul capitolului.....	19	46
2. Ingineria traficului în rețele de acces inter-modale.....	20	47
2.1. Platforma de ingineria traficului.....	21	49
2.2. Metodele propuse pentru repartizarea traficului.....	21	50
2.2.1. Metoda tehnicilor aleatoare.....	21	50
2.2.2. Metoda “Tehnicilor echilibrate” (TE).....	22	50
2.2.3. Metoda evitării congestiei (EC) .....	22	51
2.2.4. Metoda traficului mediu (TM) .....	22	51
2.3. Modelarea direcționării traficului.....	23	51
2.4. Simularea probabilităților de accesare.....	23	53
2.5. Rezultate.....	24	54
2.5.1. Comparație între modelul teoretic și rezultatele simulării.....	24	54

2.5.2.	Comparație între metodele evitării congestiei și cea a traficului mediu, raportate la metoda TE.....	26	58
2.6.	Impactul trecerii la 4G asupra debitului.....	27	59
2.7.	Bruiajul LTE – Studiu de caz asupra dronelor.....	28	60
2.7.1.	Configurația propusă.....	28	62
2.7.2.	Evaluarea prin analiză spectrală a soluției propuse.....	28	64
2.8.	Sumarul capitolului.....	29	66
3.	Soluții pentru rețele radio definite <i>software</i> (SDR).....	31	68
3.1.	Concepte SDR.....	31	68
3.3.	Rețeaua LTE cu SDN și NFV.....	31	73
3.4.	Echipamente și posibilități de aplicații SDR.....	32	74
3.5.	Platforme <i>software</i> dedicate SDR.....	33	76
3.6.	Integrarea platformei SDR cu sistemul de informatică instrumentală <i>National Instruments</i> .....	33	77
3.7.	Soluția bazată pe SrsLTE.....	34	79
3.7.1.	SrsEPC.....	35	81
3.7.2.	SrsENB.....	36	83
3.7.3.	Instalarea srsLTE.....	36	84
3.7.4.	Conectarea la rețeaua privată LTE.....	38	91
3.8.	Sumarul capitolului.....	39	108
4.	Optimizarea rețelelor de acces pentru servicii <i>all-IP</i> .....	41	109
4.1.	Metoda hibridă (HARQ) de control a erorilor.....	41	111
4.2.	Rezultatele simulării.....	41	113
4.3.	Sumarul capitolului.....	43	118
5.	Implementarea serviciilor multimedia în rețelele LTE.....	45	119
5.1.	Soluții existente.....	45	119
5.1.1.	Revenirea la rețeaua cu comutație de circuite (CSFB – <i>CS fallback</i> ).....	45	119
5.1.2.	VoLGA – Voce prin LTE prin Acces Generic.....	45	120
5.1.3.	Neîntreruperea apelului vocal păstrând purtătoarea - <i>Single Radio Voice Call Continuity</i> .....	45	121
5.1.4.	Servicii și aplicații VoIP.....	45	121
5.2.	Demonstrator IMS LTE.....	46	122
5.3.	Demonstrator SIP.....	47	123
5.4.	Traficul video în configurațiile LTE multi-antenă.....	48	125
5.5.	Caracteristicile transmisiei video prin radio.....	49	126

5.6. Parametrii folosiți.....	49	127
5.7. Rezultatele experimentale.....	50	129
5.8. Sumarul capitolului.....	51	131
6. Soluții P2P pentru îmbunătățirea serviciilor în rețelele radio.....	53	133
6.1. Arhitecturile P2P si LTE.....	53	133
6.2. Rețele cu organizare automată.....	53	134
6.3. Tipuri de topologii in rețelele P2P.....	54	137
6.3.1. Proprietățile și avantajele P2P.....	55	137
6.3.2. Topologiile P2P în arhitectura LTE.....	55	138
6.4. Studiu de caz pentru adaptarea P2P la o rețea LTE.....	56	141
6.5. Realizare experimentală pe modele de trafic “live” .....	57	144
6.5.1. Testul 1 – trafic HTTP.....	58	145
6.5.2. Testul 2 – VoIP cu UDP.....	58	147
6.5.4. Testul 4 – <i>attach storm</i> .....	59	151
6.5.5. Testul 5 – VoIP cu TCP.....	60	153
6.5.6. Testul 6 – <i>stateless peer</i> .....	61	156
6.6. Sumarul capitolului.....	61	159
7. Concluzii generale si contribuții originale.....	63	161
7.1. Principalele contribuții originale.....	63	162
7.2. Direcții viitoare de cercetare.....	68	168
7.3. Validarea și diseminarea rezultatelor științifice.....	70	169
7.3.1. Lucrări proprii indexate ISI.....	70	169
7.3.2. Alte lucrări indexate într-o bază de date recunoscută de comisia CNATDCU de specialitate - <i>DBLP (Digital Bibliography &amp; Library Project) – De Gruyter</i> .....	71	171
7.3.3. Lucrări proprii indexate în BDI EBSCO.....	72	171
7.3.4. Articole publicate in reviste românești recunoscute de CNCSIS – categoria B+ .....	72	171
7.3.5. Lucrări proprii publicate în volumele cu ISSN ale unor conferințe internaționale, cu comitet de recenzori.....	72	172
7.3.6. Lucrare în curs de publicare în volum indexat ISI la Editura Springer.....	72	172
Bibliografie.....	74	173
Rezumat / Abstract (english).....	81	A35

# Table of contents

	Abstract pg.	Thesis pg.
Introduction.....	5	10
PhD Thesis Opportunity.....	5	10
PhD Thesis Objectives.....	6	11
PhD Thesis Structure.....	7	13
Laboratory Groundwork.....	8	14
1. Current Status in the Thesis' Research Field.....	10	16
1.1. LTE Mobile Communications.....	10	16
1.1.1. LTE <i>Release 8</i> .....	10	16
1.1.2. <i>IMT-Advanced</i> .....	10	18
1.1.3. LTE <i>Release 10 (LTE-Advanced)</i> .....	11	18
1.1.4. <i>Release 11 and 12</i> .....	13	27
1.1.5. IFOM – IP Flow Mobility.....	14	32
1.2. LTE Access Network Features.....	15	34
1.2.1. Frequency Bands.....	15	34
1.2.2. LTE Network Architecture.....	15	34
1.2.3. eNodeB Role.....	16	38
1.2.4. LTE Interfaces.....	18	38
1.2.5. E-UTRAN and E-UTRA.....	18	44
1.3. Chapter Summary.....	19	46
2. Traffic engineering in Access Networks.....	20	47
2.1. The Traffic Engineering Platform.....	21	49
2.2. Traffic Guidance proposed Methods.....	21	50
2.2.1. The Random Techniques Method.....	21	50
2.2.2. The Balanced Techniques Method.....	22	50
2.2.3. The Congestion Avoidance Method.....	22	51
2.2.4. The Average Traffic Method.....	22	51
2.3. The Traffic Guidance Model.....	23	51
2.4. Access Probabilities Simulation.....	23	53
2.5. Results.....	24	54
2.5.1. Comparison between the Theoretic Model and Simulation Results.....	24	54

2.5.2. Comparison between Dynamic Methods and Balanced Technique Method.....	26	58
2.6. The Throughput Impact due to 4G Switch.....	27	59
2.7. LTE Jamming – UAV Case Study.....	28	60
2.7.1. Proposed configuration.....	28	62
2.7.2. Spectral Analysis Evaluation of the Proposed Solution.....	28	64
2.8. Chapter Summary.....	29	66
3. Software Defined Radio Solutions.....	31	68
3.1. SDR Concepts.....	31	68
3.3. The LTE Network with Virtualization.....	31	73
3.4. SDR Equipment and Applications.....	32	74
3.5. SDR Software Platforms.....	33	76
3.6. SDR Integration with the National Instruments platform .....	33	77
3.7. SrsLTE Solution.....	34	79
3.7.1. SrsEPC.....	35	81
3.7.2. SrsENB.....	36	83
3.7.3. srsLTE Integration.....	36	84
3.7.4. Network Connection Procedure with Logs and Traces.....	38	91
3.8. Chapter Summary.....	39	108
4. Access Network Optimization for all-IP services.....	41	109
4.1. The HARQ Error Control Method.....	41	111
4.2. Simulation Results.....	41	113
4.3. Chapter Summary.....	43	118
5. LTE multimedia Services Implementation.....	45	119
5.1. Solutions in place.....	45	119
5.1.1. Circuit Switched Fallback).....	45	119
5.1.2. VoLGA – Voice over prin LTE Generic Access.....	45	120
5.1.3. Single Radio Voice Call Continuity.....	45	121
5.1.4. VoIP Services and Applications.....	45	121
5.2. IMS LTE Demonstrator.....	46	122
5.3. SIP Demonstrator.....	47	123
5.4. Video Traffic in MIMO LTE.....	48	125
5.5. Video Transmission Features.....	49	126
5.6. Parameters used.....	49	127
5.7. Experimental Results.....	50	129
5.8. Chapter Summary.....	51	131

6.	P2P Solutions for Radio Network Improvements.....	53	133
6.1.	P2P and LTE Architectures.....	53	133
6.2.	Self Organizing Networks.....	53	134
6.3.	P2P Topologies.....	54	137
6.3.1.	P2P Features and Advantages.....	55	137
6.3.2.	P2P in LTE Architecture.....	55	138
6.4.	Case Study for P2P Adaptation to a LTE Network.....	56	141
6.5.	Experiments on “live” Traffic Networks.....	57	144
6.5.1.	Test 1 – HTTP traffic HTTP.....	58	145
6.5.2.	Test 2 – UDP VoIP.....	58	147
6.5.4.	Test 4 – Attach storm.....	59	151
6.5.5.	Test 5 – TCP VoIP.....	60	153
6.5.6.	Test 6 – Stateless peer.....	61	156
6.6.	Chapter Summary.....	61	159
7.	General Conclusions and Original Contributions.....	63	161
7.1.	Main Original Contributions.....	63	162
7.2.	Future Research Directions.....	68	168
7.3.	Validation and Dissemination of Scientific Results.....	70	169
7.3.1.	ISI Indexed Published Works.....	70	169
7.3.2.	Other published works indexed in a CNATDCU Committee recognised Database - DBLP (Digital Bibliography & Library Project) – De Gruyter.....	71	171
7.3.3.	BDI EBSCO Indexed Published Works.....	72	171
7.3.4.	Published works in CNCSIS recognised magazines – B+ rank.....	72	171
7.3.5.	ISSN International Conferences published works.....	72	172
7.3.6.	Springer ISI to be indexed published work.....	72	172
	Bibliography.....	74	173
	Rezumat / Abstract (english).....	81	A35



## Introducere

Tehnologiile de comunicații mobile, privite *grosso modo* sub aspect *software*, au suferit mai multe iterații, cunoscute sub numele de "Ediții" - „*Releases*”, adică versiuni de soft. Referitor la LTE, prima dintre acestea a fost dată în folosință în anul 2008 și s-a numit **LTE Release 8**. Aceste „*Releases*” nu trebuie reținute ca fiind strict reprezentative pentru tehnologia LTE, ci ele țin de tehnologiile mobile în general. Iterațiile lor trec prin toate tehnologiile mobile cunoscute până în prezent. Spre exemplu tehnologia GSM/EDGE este cunoscută și sub numele de *Release 4* iar *Release 17* ține de tehnologia 5G și este programată să fie livrată în 2021.

Tehnologia *Long Term Evolution* (LTE) a fost definită de organizația *Third Generation Partnership Project* (3GPP). Scopul și necesitatea cercetării acestei tehnologii a fost nevoia utilizatorilor de a avea viteze mai mari pentru traficul de date. În acest sens, tehnologia LTE a fost concepută în special pentru acest trafic, neexistând inițial suport pentru traficul de voce.

*Release 8* îmbunătățește eficiența spectrală și pune la dispoziția utilizatorilor viteze ale datelor de 300 Mbps pe direcția *downlink* iar pe cea *uplink* de 75 Mbps. De asemenea, *Release 8* suportă tehnologiile duplex de divizare în timp și frecvență și reprezintă pasul următor din perspectiva tehnologiilor WCDMA/HSPA și CDMA 2000.

Lui *Release 8* i-a urmat *Release 9* în anul 2009. Acesta a adus un strat nou de servicii, printre care cele mai importante sunt serviciile de locație, suportul pentru servicii de urgență, suportul pentru aplicații de tip *multicast* și îmbunătățiri pentru formarea fasciculului, așa-numitul „*beamforming*”, pe direcția *downlink*.

În următorul an, 2010, a apărut versiunea *Release 10* care este cunoscută și sub numele de **LTE-Advanced**. Motivul pentru această denumire este că organizația *International Telecommunication Union* (ITU) a definit o serie de cerințe care au fost strânse laolaltă sub numele de **IMT-Advanced**. *LTE Release 10* suportă cu succes toate aceste cerințe de unde rezultă și cealaltă denumire a acestei versiuni.

*Release 11* a adus optimizări tuturor caracteristicilor *Release 10* și dezvoltări în sectoarele interfețelor radio, rețelei *core* și a serviciilor. Standardele sub care aceasta urma să funcționeze au fost stabilite la începutul anului 2013.

*Release 12*, definitivată în anul 2015, a continuat seria de optimizări asupra caracteristicilor *Release 10*, le-a aprofundat și pe cele ale *Release 11*, având ținta de a îmbunătăți eficiența, securitatea și serviciile de urgență ale rețelelor 4G. Datorită acestui aspect, literatura de specialitate consideră că noțiunea de **LTE-Advanced** înglobează aceste trei versiuni – 10, 11 și 12.

## Oportunitatea tezei de doctorat

În contextul introducerii unei noi tehnologii de telecomunicații mobile, și anume 5G, mulți dintre operatorii de comunicații vor dori să-și optimizeze toate rețelele deja existente. Prin deschiderile sale lucrarea pășește către câteva dintre avantajele noilor versiuni în special MIMO, evitarea congestiilor, și o nouă abordare pentru *peering*.

Un impediment serios în cercetarea rețelelor de acces îl reprezintă lipsa laboratoarelor care să înglobeze, într-o cât mai mare măsură, o rețea mobilă. Pe lângă acest aspect al *completitudinii* sub aspectul funcțiilor / capabilităților ("*sales features*") resursele trebuie dublate de echipamente de testare / monitorizare / emulare, de "încărcare" cu trafic – "*load & stress*" (în scenarii care vizează uneori și limitele de capacitate).

Una din oportunitățile tezei de doctorat este însăși nevoia de astfel de sisteme de *inginerie a traficului*.

Singurele rețele ideale pentru testare sunt înseși rețelele operatorilor comerciali, dar accesul asupra acestora este permis doar în părți extrem de reduse ale rețelei și doar în ferestre orare neîndelungate în care traficul este redus, timp în care o cercetare aplicativă nu se poate desfășura riguros. Astfel, o direcție viitoare, care prinde contur din ce în ce mai mult, este simularea unei rețele sau a unui subsistem privat, scalabil, adaptabil, versatil, "*future-proof*", cu ajutorul sistemelor radio definite *software* (SDR), folosind *software* din sursă deschisă (*open-source*), bineînțeles, în limitele stricte ale legalității.

Este unanim acceptat faptul că "generațiile" comunicațiilor mobile au însemnat schimbări majore mai ales în sub-sistemele radio și în rețelele de acces, care fac obiectul acestei lucrări. Oportunitatea tezei de doctorat corespunde așadar aceleiași tendințe orientate permanent către creșterea performanței – nu numai prin noi scheme de modulație dar, și mai ales, prin măsuri de exploatare optimizată, de îmbunătățire a *managementului* resurselor.

## Obiectivele tezei de doctorat

Managementul *sustenabil* al rețelei de acces are în vedere soluții *durabile* care corespund tendințelor MIMO (*Multiple Input / Multiple Output*) de integrare tot mai pronunțată a stațiilor radio cu antenele inteligente, păstrând nivelul intermediar, distinct, al echipamentelor de *control* care, preiau tot mai multe funcții de procesare digitală a semnalelor (DSP – *Digital Signal Processing*) pentru *mo-dem*, *co-dec*, orchestrare/secvențiere ("*scheduling*") etc, așadar foarte susceptibile prin integrarea cu SDR inclusiv pentru interfațarea versatilă (reconfigurabilă) a acestor sub-rețele.

Rezultă de aici obiectivul de încadrare a soluțiilor dezvoltate în recomandările T.M.3000 (pentru *Telecommunications Management Networks - TMN*), emise de ITU (*International Telecommunications Union*).

- Planificarea radio – alocarea celulelor radio cu ajutorul antenelor cu fascicule reglabile / alocarea frecvențelor / alegerea schemelor de modulație – are în vedere calculul optimal al scenariilor de modificare (cu modificări minime ale configurațiilor anterioare), verificare de consistență, descărcare a parametrilor, activare a noului plan de rețea și verificare a metricilor de bună funcționare doar pentru nodurile care trebuie re-programate.
- Respectarea modelului IRP ("*Integration Reference Point*") bazat pe principiile 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) asupra definirii interfețelor de management, cu un minimum de dependențe tehnologice sau de protocol, printr-o abordare de sus-în jos ("*top-down*") orientată

pe procedură; formate generice (XML, JSON etc) ale fișierelor de configurare, ale containerelor de date, ale raportării eventualelor erori de configurare ș.a.m.d.

- Distribuția resurselor unei rețele de comunicații mobile cu ajutorul unor aplicații care să permită fluidizarea desfășurării traficului, prin echilibrarea încărcării cu trafic a entităților implicate, fără o participare centralizată.
- Acțiunea de repartizare a funcțiilor va fi construită pe toate nivelele unei rețele LTE, prin dependență reciprocă, având în vedere atât încărcarea, fiabilitatea, extinderea acesteia, cât și costurile implicate.
- Găsirea unor soluții care să satisfacă necesitățile de creștere a volumelor de trafic aleator, atât în rețeaua de semnalizări cât și în cea de date, cu evitarea apariției congestiilor la diferite nivele ale rețelei.
- Rezolvarea unor probleme stringente de distribuție a traficului între rețelele de generații diferite, cu posibilități de acces diferite, în condițiile utilizării de terminale cu capacități diferite. Legat de acest obiectiv, care presupune și folosirea intensă a resurselor radio, vor trebui aduse optimizări ale acestora.
- Depistarea unor metode care să satisfacă distribuțiile de trafic pe rețele de generații diferite coordonate de același operator, odată cu implementarea tehnologiei LTE, vis-a-vis de dezvoltarea rețelei și a capacităților ei de scurgere a traficului.
- Evitarea unor conflicte care ar putea apărea în funcționalitatea rețelei de comunicații radio, în contextul accesării domeniilor de frecvențe repartizate de ANCOM, de către alte tehnologii cu funcționare similară cu LTE.
- Analiza calității (QoS) serviciilor de voce și video desfășurate pe baza rețelei LTE, precum și din punct de vedere al volumelor variabile de trafic produs de aceste servicii, luând în considerare vârful de trafic care pot destabiliza rețeaua.

Prin abordarea funcțională, cu grad sporit de programabilitate, a soluțiilor de management al resurselor radio, dezvoltate și testate pe o platformă de ingineria traficului, se va urmări interoperabilitatea sporită cu diversitatea ("*multi-vendor*") a rețelelor operatorilor de comunicații mobile.

Sistemele de ingineria traficului dezvoltate trebuie să reprezinte:

- *O prelungire a funcțiilor de monitorizare în funcții de control* și, în particular,
- *O prelungire a funcțiilor de control prin creșterea gradului de programabilitate.*

Identificarea unor soluții pentru analiza la nivel de laborator, (cu evitarea testării în contextul rețelei operative) va folosi echipamente de simulare a unor scenarii de încărcare a traficului și de congestii, precum și soluții *software* care să suplinească diferite componente ale sistemelor de acces din rețelele LTE.

Un obiectiv specific îl reprezintă *coborârea programabilității în profunzimea stivei OSI* pentru rețele de acces, prin soluții *Radio Defined Software – SDR (Software Defined Radio)*.

## Organizarea tezei de doctorat

Teza este alcătuită din 7 capitole astfel: fiecare dintre primele 6 abordează rețeaua mobilă LTE dintr-o serie de perspective problematice actualității, conform obiectivelor menționate anterior; ultimul capitol cuprinde concluziile generale și contribuțiile originale împreună cu validarea și diseminarea rezultatelor științifice în publicații. Finalul tezei include bibliografia (170 de titluri) și două anexe, prima afișând capturile (*logfiles*) rețelei private LTE construită și descrisă în capitolul 3, iar cea de-a doua cuprinde trei lucrări reprezentative ale autorului. Datorită caracterului tehnic al tezei, pe parcursul ei se regăsesc o serie de termeni nativi limbii engleze scriși între ghilimele sau cu *caractere italice*, în locurile unde adaptarea lor în limba română ar fi denaturat sensul cuvântului original.

Introducerea cuprinde oportunitatea tezei și obiectivele propuse către optimizarea rețelelor LTE, precum și descrierea bazei experimentale folosite într-o serie de experimente descrise în teza.

Capitolul 1, denumit "Contextul tehnologic actual. Stadiul cercetărilor în domeniul tezei", descrie comprehensiv o rețea LTE împreună cu diferitele versiuni succesive prin care această a trecut de-a lungul timpului, menționându-se și caracteristicile care au revoluționat tehnologia mobilă și care au adus unicitate pentru LTE. Sunt explicate arhitectura rețelei LTE împreună cu o serie de interfețe dintre diferite entități ale rețelei, deoarece acestea constituie temelia pe care se sprijină cercetările din capitolele următoare.

Capitolul 2, intitulat "Ingineria traficului în rețele de acces inter-modale", abordează subiectul *load & stress* al traficului rețelelor LTE din două perspective fundamentale: pe de o parte din unghiul fluidizării acestuia și minimizării riscului de congestie prin patru metode de echilibrare a traficului, iar pe de altă parte, din unghiul blocării sau bruiajului acestuia din rațiuni obiective. Contribuțiile evidențiate includ și un exemplu al blocării pătrunderii unei drone într-un spațiu interzis, ca urmare a numeroaselor incidente de securitate apărute odată cu dezvoltarea acestor aparate.

Capitolul 3, "Soluții pentru rețele radio definite *software* (SDR)", descrie conceptele SDR și o rețea privată funcțională LTE care a fost implementată și a extins baza de cercetare aplicativă a ICDT (Institutul de Cercetare-Dezvoltare "Transilvania"). Rețeaua privată simulează entitățile unei rețele LTE, se activează și își poate schimba caracteristicile rapid (*fast deployment*) prin linie de comandă, inclusiv cele de securitate (cartele SIM personalizate), și funcționează într-un spațiu legal conform parametrilor LTE, fapt demonstrat prin analiza capturilor Wireshark prezente în acest capitol.

Capitolul 4, "Optimizarea rețelelor de acces pentru servicii *all-IP*", a analizat posibilitățile de eficientizare ale acestor servicii (dat fiind faptul că tehnologia LTE a fost proiectată pentru traficul de date) în condiții ideale și reale, în funcție de criterii ca lărgimea de bandă, modulația, schema de codare, transmisia HARQ (tehnică folosită la corecția erorilor), vocodere, cuplate cu programările dinamice și semi-persistentă, contribuțiile aduse ținând obținerea unei calități cât mai mari a sesiunilor rețelei.

Capitolul 5, intitulat "Implementarea serviciilor multimedia în rețelele LTE", cuprinde două părți. Prima abordează problema asigurării de voce prin LTE (vocea nefiind scopul principal al LTE) și analizează patru soluții disponibile, propunând-o pe cea mai bună conform cu particularitățile rețelei

oricărui operator mobil. Aici o altă contribuție o reprezintă proiectarea și realizarea unui demonstrator de voce prin LTE. A doua parte completează studiul și contribuțiile asupra traficului și optimizării din capitolele 2 și 4 cu o analiză asupra posibilităților de îmbunătățire al celui mai instabil și exploziv tip de trafic al actualității - cel video, cu ajutorul sistemelor multi-antena, luându-se în calcul și parametri specifici ai abonatului, nu numai ai rețelei (viteza de deplasare și puterea de emisie a terminalului).

Capitolul 6, "Soluții *peer-to-peer* pentru îmbunătățirea serviciilor rețelelor radio", propune o abordare orientată spre simplificarea și eficientizarea rețelelor LTE, prin împărțirea acestora în trei regiuni și introducerea în fiecare a principiilor și topologiilor P2P. Sunt analizate rețele LTE reprezentative din Germania și Botswana iar contribuțiile includ și o simulare extinsă cu valori reale de trafic în care sunt analizate diferențele între performanțele reale și cele obținute în cazul introducerii P2P în rețea, în funcție de tipuri diferite de trafic IP.

Capitolul cu care se încheie teza cuprinde concluziile generale și contribuțiile originale, direcțiile viitoare de cercetare și validarea și diseminarea rezultatelor științifice în publicații de specialitate.

Bibliografia și web-grafia tezei cuprind 170 de lucrări. Totodată se adaugă și 17 articole proprii publicate, la 10 dintre acestea fiind prim autor.

Anexa 1 prezintă capturile extinse rezultate în urma analizei funcționării rețelei private din capitolul 3, unde, datorită dimensiunii lor, au fost expuse doar fragmentele indispensabile analizei. De asemenea mesajele studiate sunt prezentate și într-o formă facilă de urmărit, iar pentru aprofundare se poate consulta respectivul mesaj în modul extins.

Anexă 2 cuprinde trei lucrări reprezentative ale autorului publicate în volume indexate ISI ale unor conferințe internaționale de specialitate.

## Baza experimentală

Am avut la dispoziție o dotare de excepție, oferită de Școala Doctorală și Institutul de Cercetare-Dezvoltare din cadrul Universității "Transilvania" din Brașov. În laboratoarele de Telecomunicații ale Facultății de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor am beneficiat de următoarele echipamente de Comunicații mobile:

- Stație de Bază SIEMENS (Transceiver, cablaj RF, conector RF, antenă echivalentă).
- BSC (*Base Station Controller*) SIEMENS cu modul TRAU (*Transcoder and Rate Adaptation Unit*).
- Node B – NB 440 – SIEMENS: Unitate de amplificare A-SHF (cu bloc SCPA/MCPA, card AMP *Supervisory & Control*, bloc *Dual Amplifier Multi-Coupler* și două amplificatoare suplimentare); Unitatea modemului de bază (E1 & STM1 *Highway Interface* și bloc *Highway Monitor*, bloc de control comun, bloc de prelucrare de semnal în banda de bază, bloc transceiver radio TRX, bloc *High Speed Downlink Packet Access* cu modul Channel Card 96 3.6Mbps (*class 6*).
- *Radio Network Controller* – SIEMENS / NEC, Model M: module *Line Switch, Central Processor Control, Signaling, MAC Header Handling, Mobile Layer 2 Control, Diversity Handover Trunk, Composite/De-composite, GPRS Tunneling Protocol, Packet Radio Link Control*.

- Monitor-Emulator de protocol, Tektronix K1297-G20: modul de monitorizare/simulare (PRIME) E1/DS1; modul *Slim Line Interface* PCE I STM-1/SONET OC-3: 155 Mb/s, Optical, LC Duplex ; modul Ethernet.
- Tester Universal pentru Radio Comunicatii Rohde-Schwarz "CMU200" – 3GPP, WCDMA-FDD, 3GPP HSPA, GSM/GPRS/EDGE, GSM-R.
- Generator Vectorial de Semnal Anritsu MG3700A (cu gama extinsă, 250 kHz - 6 GHz) + *software* de modulații digitale „*IQ producer*”: W-CDMA/HSDPA, GSM/EDGE, WLAN, Bluetooth, GPS, DVB ; "*pattern generation*" cu 256 Mega eșantioane/canal (memorie internă de 30 GB pentru forme de undă arbitrare, DAC cu 14biți pe eșantion, la o rată a eșantioanelor de cel puțin 150 MHz).



Figura 1. Infrastructura de cercetare a rețelelor de acces

Așa cum voi arăta în lucrare, aportul meu a constat în extinderea acestei infrastructuri de cercetare aplicativă în domeniul rețelelor de comunicații mobile cu:

- O platformă de ingineria traficului centrată pe Sistemul "All IP" Ixia XM2 "*Optixia - IP Performance Tester*" care acoperă, practic, întreaga stivă OSI (Open System Interconnect) prin sub-sistemele IXNetwork (nivelele 2 și 3) și IXLoad (nivelele 4-7).
- Un sistem SDR (*Software-Defined Radio*) centrat pe
  - echipamentele National Instruments – ETTUS Research USRP (*Universal Software Radio Peripherals*) tip B210 (complet integrate, cu acoperire RF continuă 70 MHz – 6 GHz, funcționare Full duplex, MIMO 2 Tx & 2 Rx cu modulații digitale IQ de 61.44MS/s cu banda de până la 56 MHz).
  - echipamentele Analog Devices – tip FDCOMMS2 bazate pe circuitul integrat AD9361 cu acoperire RF continuă 70 MHz – 6 GHz, funcționare full duplex cu bandă 200 kHz – 56 MHz și ADC  $\Sigma-\Delta$  în timp continuu, de 12 bit la 640 MSPS (Rx), DAC de 12 bit la 320 MSPS (Tx), cu filtre numerice de 128 coeficienți complecși etc.

# 1. Contextul tehnologic actual. Stadiul cercetărilor în domeniul tezei

## 1.1. Comunicațiile mobile LTE

Tehnologia LTE (*Long Term Evolution*), cunoscută și sub numele de E-UTRAN (*Evolved-UMTS Terrestrial Radio Access Network*), introdusă în 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) Release 8, reprezintă partea de acces a EPS. EPS (*Evolved Packet System*) este o tehnologie pură IP. Atât serviciile în timp real cât și cele de comunicații de date se desfășoară prin protocolul IP. Adresa IP este alocată imediat după pornirea telefonului și este eliberată doar atunci când acesta este oprit. Această tehnologie a apărut datorită existenței următoarelor cerințe:

- Nevoia ca tehnologiile radio să rămână competitive în viitor;
- Cererea utilizatorilor pentru rate de transfer din ce în ce mai mari ;
- Cererea utilizatorilor pentru o calitate mai bună a serviciilor;
- Sistem bazat pe comutație de pachete;
- Complexitate redusă;
- Cerere continuă de reducere a costurilor – CAPEX (*Capital expenditures*) și OPEX (*Operational expenditures*).

### 1.1.1. LTE Release 8

LTE folosește metoda de codare OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) însă nu pe ambele direcții de transmisie. Pe direcția *downlink* se folosește într-adevăr OFDM, însă pe direcția *uplink* se folosește DFTS-OFDM (*Discrete Fourier Transform Spread OFDM*) [1]. Scopul pentru care s-a ales această diferențiere a fost minimizarea cât mai eficientă a complexității și consumului terminalului mobil.

Semnalele folosite, indiferent de metoda de divizare, în timp sau frecvență sunt trimise în cadre de 10 ms. Fiecare dintre aceste cadre este împărțit în 10 sub-cadre, ca în fig. 2. Fiecare sub-cadru este divizat în două părți: una pentru semnalizare și control care conține între 1 și 3 simboluri OFDM și una pentru transportul datelor. De asemenea fiecare cadru conține semnale de referință specifice celulei LTE, spre exemplu semnale care măsoară starea canalelor folosite în sesiunea curentă, semnale folosite pentru decodificarea datelor la recepție ș.a.m.d. (fig. 3) [2].

### 1.1.2. IMT-Advanced

Discuția despre IMT trebuie începută de la IMT-2000. IMT-2000 reprezintă un set de cerințe definite de către ITU (*International Telecommunication Union*) care trebuie îndeplinite de orice tehnologie radio mobilă care vrea să se situeze sub această umbrelă.

	Cerința IMT-Advanced	LTE Release 8	LTE Release 10
Lărgime de bandă pentru transmisie	Cel puțin 40 MHz	Până la 20 MHz	Până la 100 MHz
Eficiența spectrală maximă - Downlink - Uplink	15 b/s/Hz 6,75 b/s/Hz	16 b/s/Hz 4 b/s/Hz	16,0 [30,0]* b/s/Hz 8,1 [16,1]** b/s/Hz
Latența - Stratul de control - Stratul de utilizator	Mai mic de 100 ms Mai mic de 10 ms	50 ms 4,9 ms	50 ms 4,9 ms

- \* valoare pentru o configurație de antenă 4x4; valoarea dintre paranteze este pentru 8x8
- \*\* valoare pentru o configurație 2x2; valoarea dintre paranteze este pentru 4x4

Tabelul 1.1.2. Cerințe și capabilități LTE Release 10

Astfel, 3GPP a demarat dezvoltarea pentru un nou standard, care urma să fie denumit *Release 10*. *Release 10* nu a urmat întocmai cerințele standardului *IMT-Advanced*, ci a acționat ușor pe cont propriu, rezultatul fiind că produsul final întrecea în câteva aspecte cerințele definite de ITU [4]. În anul 2010 ITU a primit *Release 10* și a încuviințat că acesta să fie admis sub umbrela *IMT-Advanced*. Există doar două tehnologii afiliate standardului *IMT-Advanced*: LTE Release 10 (cunoscută și drept *LTE-Advanced*) și WiMAX Release 2.

### 1.1.3. LTE Release 10 (LTE-Advanced)

Dincolo de cerințele pur tehnice cum ar fi vitezele maxime de *download* (1 Gbps) și *upload* (500 Mbps), latențe permise (10-100 ms), eficiențe spectrale și viteză de deplasare până la care o sesiune de comunicație nu va suferi întreruperi (până la 350 km/h), *Release 10* oferă câteva tehnici care au ajutat la optimizarea și eficientizarea tehnologiilor mobile.

Acestea sunt agregarea purtătoarelor, tehnica „*relaying*” și coordonarea multipunct (*Coordinated Multipoint* - CoMP). CoMP este metodă care are ca scop evitarea interferențelor inter-celulare și care reușește să exploateze interferențele pentru a asigura viteze mai bune abonaților situați la marginile celulelor.

#### 1.1.3.1. Agregarea purtătoarelor

În scopul realizării cerinței formulate de ITU referitoare la mărirea capacității datelor transmise cu ajutorul rețelei mobile (practic s-a dorit lărgirea benzii disponibile), a fost dezvoltată funcționalitatea agregării purtătoarelor. Pe scurt, aceasta permite combinarea mai multor purtătoare în aceeași bandă de frecvență sau în mai multe benzi diferite.



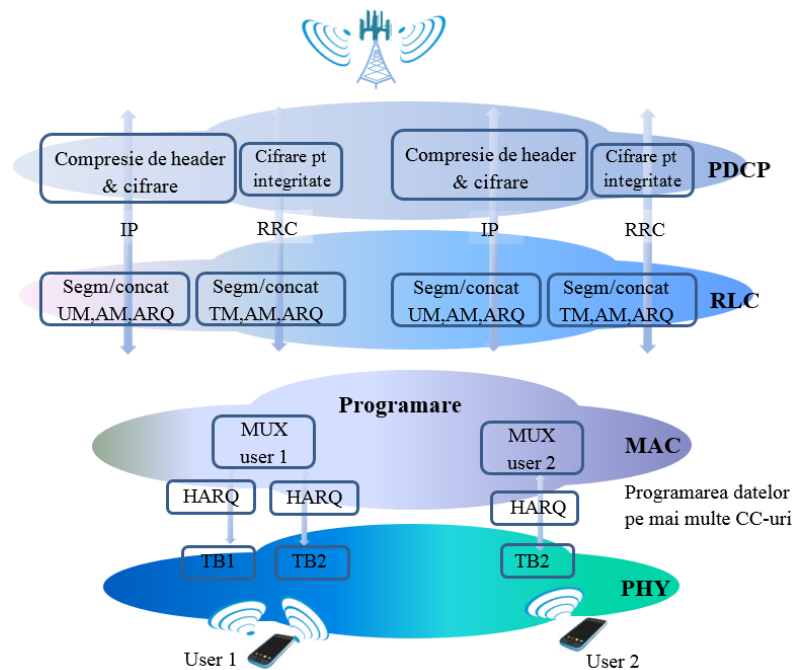


Fig. 4. Agregarea purtătoarelor în LTE *Release* 10

### 1.1.3.2. Configurațiile multi-antenă

Semnalele radio ajung adesea la receptor într-o stare degradată datorită propagării pe mai multe căi, indirecte. Este destul de rar cazul în care receptorul și eNodeB au vizibilitate directă (*line of sight*), astfel că semnalul ajunge la recepție ricoșând din corpurile solide întâlnite pe traseu. Astfel, capacitatea și siguranța legăturilor radio se reduc.

Se introduce deci conceptul de *diversitate*, pentru ca receptorul să primească mai multe versiuni ale aceluiași semnal în scopul de a reduce semnificativ degradarea semnalului și de a crește performanța legăturii radio. Acest concept este deci folosit la MIMO.

Astfel se poate crește robustețea legăturii radio folosind diversitatea spațială și în același timp crește eficient și capacitatea acesteia cu ajutorul multiplexării spațiale.

### 1.1.3.3. Implementările eterogene

Există însă mai multe posibilități de a îmbunătăți acoperirea. Cea mai simplă metodă este introducerea unor celule de dimensiuni mai mici, de putere mai mică și care servesc arii reduse. Aceste arii sunt în general alese după un studiu al traficului și sunt cele în care riscul de congestie este cel mai mare sau în zone în care acoperirea celulelor macro este slabă. Acestea pot fi amplasate atât în exterior cât și în interior. De asemenea, acestea îmbunătățesc performanța rețelei și calitatea serviciilor, preluând o parte din încărcarea rețelei macro.

Se ajunge astfel la o rețea eterogenă care arată că un amalgam de macro-celule cu pico și femto-celule (fig. 6), acestea fiind alese în funcție de puterea de emisie a eNodeB.

Această caracteristică este disponibilă din *Release* 8/9. Îmbunătățiri și alte caracteristici suplimentare au fost implementate și livrate de *Release* 10.

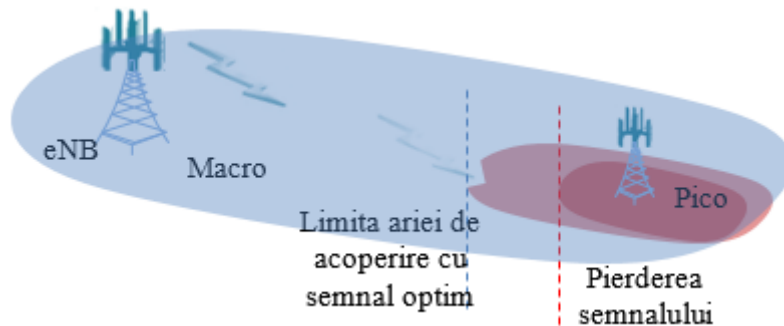


Fig. 6. Două celule ale unei rețele eterogene

O altă metodă de a îmbunătăți acoperirea este folosirea de noduri „releu” sau „*relay*”. Nodul *relay* reprezintă un nod amplasat într-un punct de unde singură sa conexiune cu cel macro este fără fir. El retransmite mesajele între eNB și terminalele mobile folosind comunicație multihop. eNodeB la care este conectat nodul *relay* va fi numit eNodeB „donor”. Din punctul de vedere al terminalului mobil, nodul *relay* este tot un eNodeB. Din punctul de vedere al eNodeB donor, nodul *relay* este un terminal mobil [10].

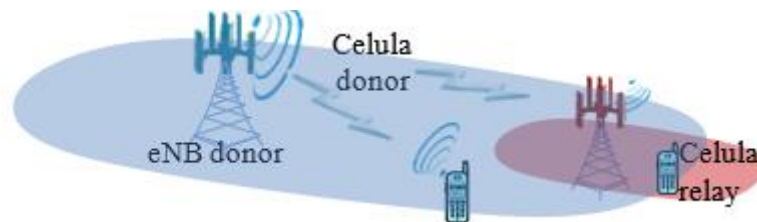


Fig. 7. Celulă *relay*

#### 1.1.3.4. ICIC (*InterCell Interference Coordination*)

Din perspectiva datelor a unui sub-cadru, problema interferențelor nu prezintă importanță mare datorită faptului că mecanismul ICIC este prezent în LTE încă din *Release* 8. Cu ajutorul ICIC, celule diferite pot schimba informații între ele despre ce frecvențe intenționează să asigneze pentru transmisii în viitorul apropiat, astfel reducând sau eliminând interferența intercelulară. ICIC se folosește pentru a coordona în mod dinamic resursele între straturile celulei, și pentru evitarea suprapunerii aceluiași resurse.

#### 1.1.4. *Release* 11 și 12

*Release* 11 oferă îmbunătățiri tehnologiilor introduse în *Release* 10, și introduce caracteristici noi care urmează să fie discutate în cele ce urmează. Figura 8 descrie cronologia acestora, iar lista este preluată de la [14].

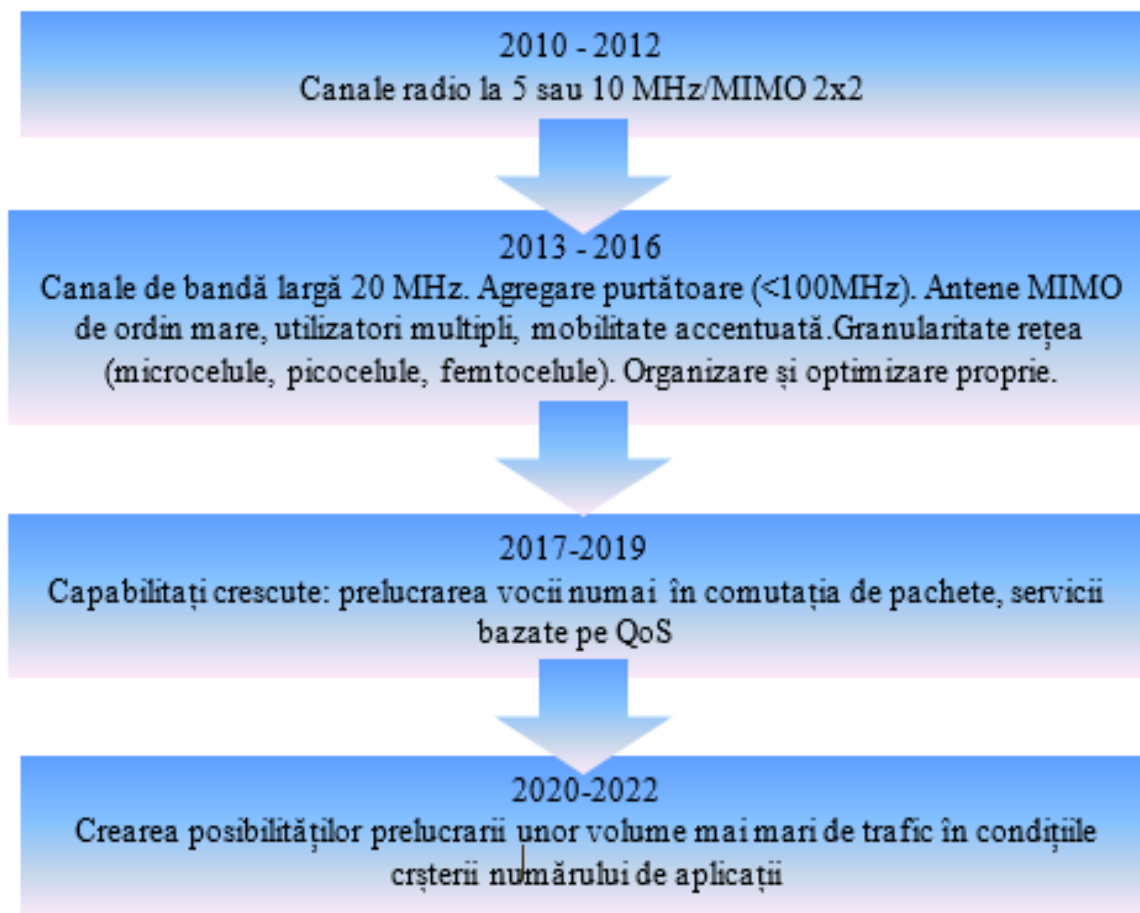


Fig. 8. Platforma versiunilor LTE

#### 1.1.5. Mobilitatea IP împreună cu echilibrare în WLAN – IFOM

Este cunoscut faptul că traficul de date efectuat de terminalele mobile este într-o continuă creștere. Acest aspect a condus la căutarea unor metode care să ușureze încărcarea pe rețeaua mobilă, una dintre ele fiind IFOM. Mecanismul dorit este să se permită ca traficul de date să fie transmis prin rețele adiacente, cum ar fi WiFi și microcelule.

În figura 9 poate observa că un apel vocal este realizat prin eNB iar datele sunt încărcate simultan printr-un *access point*. Funcționalitatea IFOM depinde de UE. Acesta apelează necesitatea utilizării de conexiuni simultane la rețeaua principală LTE și la cea secundară (WiFi). Astfel, IFOM este o caracteristică compatibilă doar cu terminalele capabile de tehnologie dincolo de *Release 10*, așa după cum este descrisă în 3GPP TS 123.261 [36].

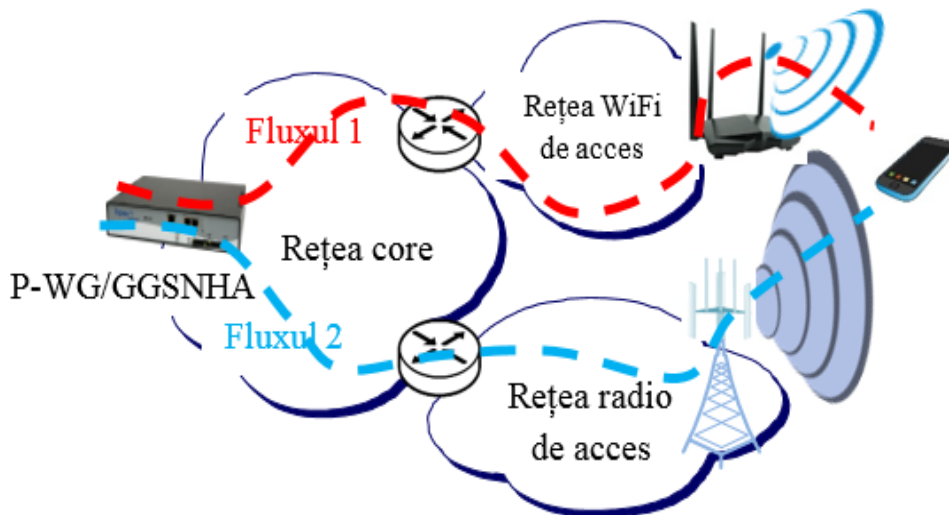


Fig. 9. Funcționalitatea IFOM

## 1.2. Caracteristicile rețelei de acces LTE

### 1.2.1. Benzi de frecvență

Rețelele LTE utilizează lățimi de bandă de 1.4, 3, 5, 10, 15 și 20 Mhz. Tabelul 1.2.1 enumeră primele 50 de benzi și frecvențe de operare LTE [41], cele mai comune folosite în Europa fiind benzile între 1 și 40.

LTE folosește următoarele tipuri de modulație [42]:

- *Downlink*: QPSK, 16-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), 64-QAM, 256-QAM;
- *Uplink*: QPSK, 16-QAM, 64-QAM (în funcție de capacitatea terminalului);
- Un QAM inferior este mai puternic împotriva zgomotului și interferențelor, în timp ce un QAM superior oferă o viteză mai mare a datelor.

### 1.2.2. Arhitectura rețelei LTE

Standardul 3GPP TS 23.002 [43] descrie arhitectura rețelei și o serie de proceduri referitoare la controlul accesului în rețea, rutarea și transferul pachetelor.

Rețeaua E-UTRAN cuprinde:

- Echipamentul utilizatorului (UE)
- Stațiile de bază eNodeB dezvoltate (*evolved NodeB*)
- Rețeaua de acces E-UTRA

Rețeaua EPC (*Evolved Packet Core*) este alcătuită din componente cu funcții de management al mobilității, autentificare, asigurarea calității serviciului, rutarea pachetelor (pe sensuri *uplink* și *downlink*), alocarea adreselor IP, și altele.

Ea cuprinde:

- Echipamentele care gestionează mobilitatea în cadrul sistemului MME (*Mobility Management Entity*);
- Echipamentele S-GW (*Serving Gateway*) care servesc la transferul pachetelor de date ale utilizatorilor, între nodurile vecine eNodeB și mențin legătura cu terminalele mobile;
- Echipamentele P-GW (*Packet Data Network Gateway*) care asigură conexiunile cu alte rețele de date externe, constituind punctul de ieșire și de intrare al traficului pentru UE;
- Baza de date centrală HSS (*Home Subscriber Server*) care conține informații despre abonați, autentificarea și permisia acestora în rețea, și care asigură funcții pentru stabilirea sesiunilor;
- Politicile și taxarea sunt deservite de PCRF (*Policy and Charging Rules Function*), care de asemenea transmite informații privind QoS pentru fiecare sesiune.

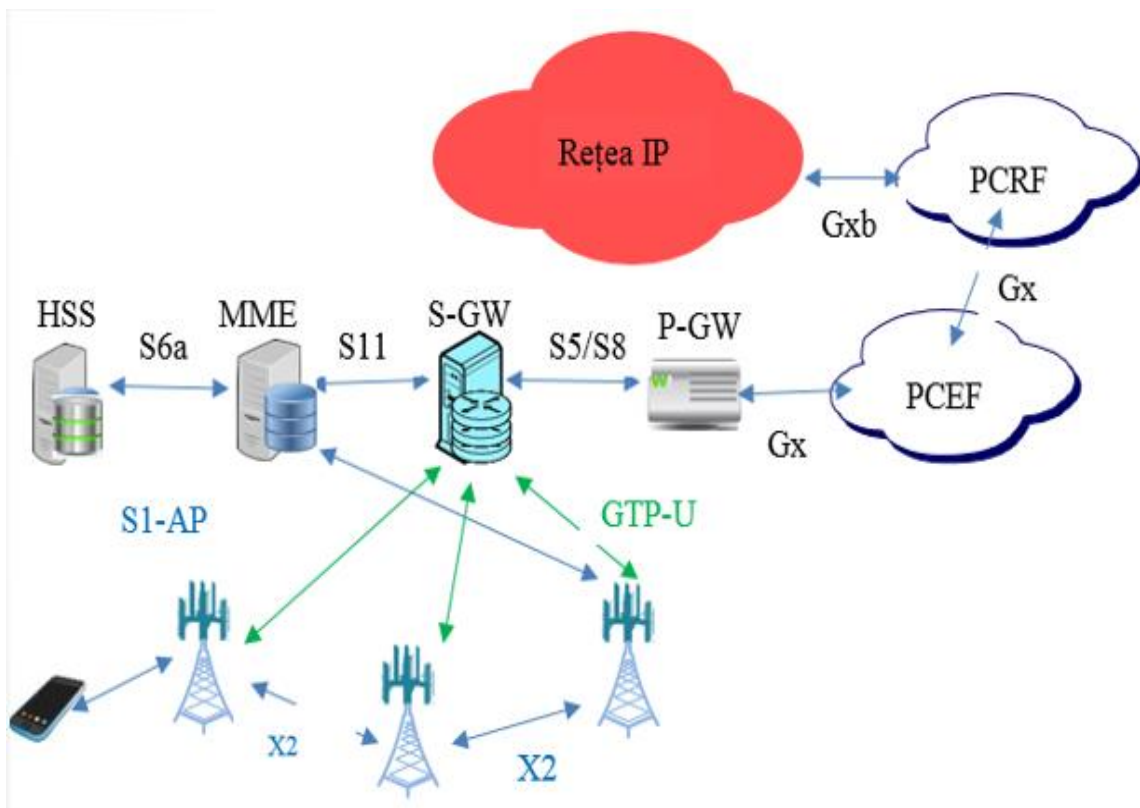


Fig. 10. Arhitectura *Evolved Packet Core*

### 1.2.3. Rolul eNodeB

eNodeB permite terminalelor să se conecteze la rețea folosind semnalele de RF.

În afară de comunicarea cu terminalul, un eNodeB asigură legături cu alte eNodeB-uri și cu echipamentele EPC, folosind interfețele  $U_u$ ,  $X_2$  sau  $S_1$ .

Pentru că eNodeB reprezintă interfața generală dintre utilizator și rețea, el administrează funcțiile de mai jos [45].

- Alocarea, controlul și managementul resurselor radio:
  - Configurarea, lansarea și întreținerea purtătoarelor radio;
  - Gestionarea resurselor radio pentru UE, pentru funcționare inactivă și conectată;
  - Controlul accesului legat de cererile de configurare a purtătoarelor radio;
  - Alocarea și eliberarea resurselor radio în planul utilizatorului și în planul de control.
  
- Selecția unui echipament MME pentru:
  - Stabilirea unei rute către un MME, pe baza datelor primite de la UE;
  - Asigurarea servirii de către un MME disponibil, când UE funcționează în modul atașat.
  
- Comprimarea și criptarea pachetelor:
  
- Transmisia și recepția:
  - Mesajelor de *paging*, mesajelor OM și a celor de difuzare prin interfața  $U_u$ ;
  - Informațiilor de difuzare și a mesajelor de *paging*, de la un echipament OM, referitoare la funcțiile de operare și întreținere.
  
- Rutarea pachetelor spre interfața S-GW, din planul utilizatorului.

#### 1.2.4. Interfețele LTE

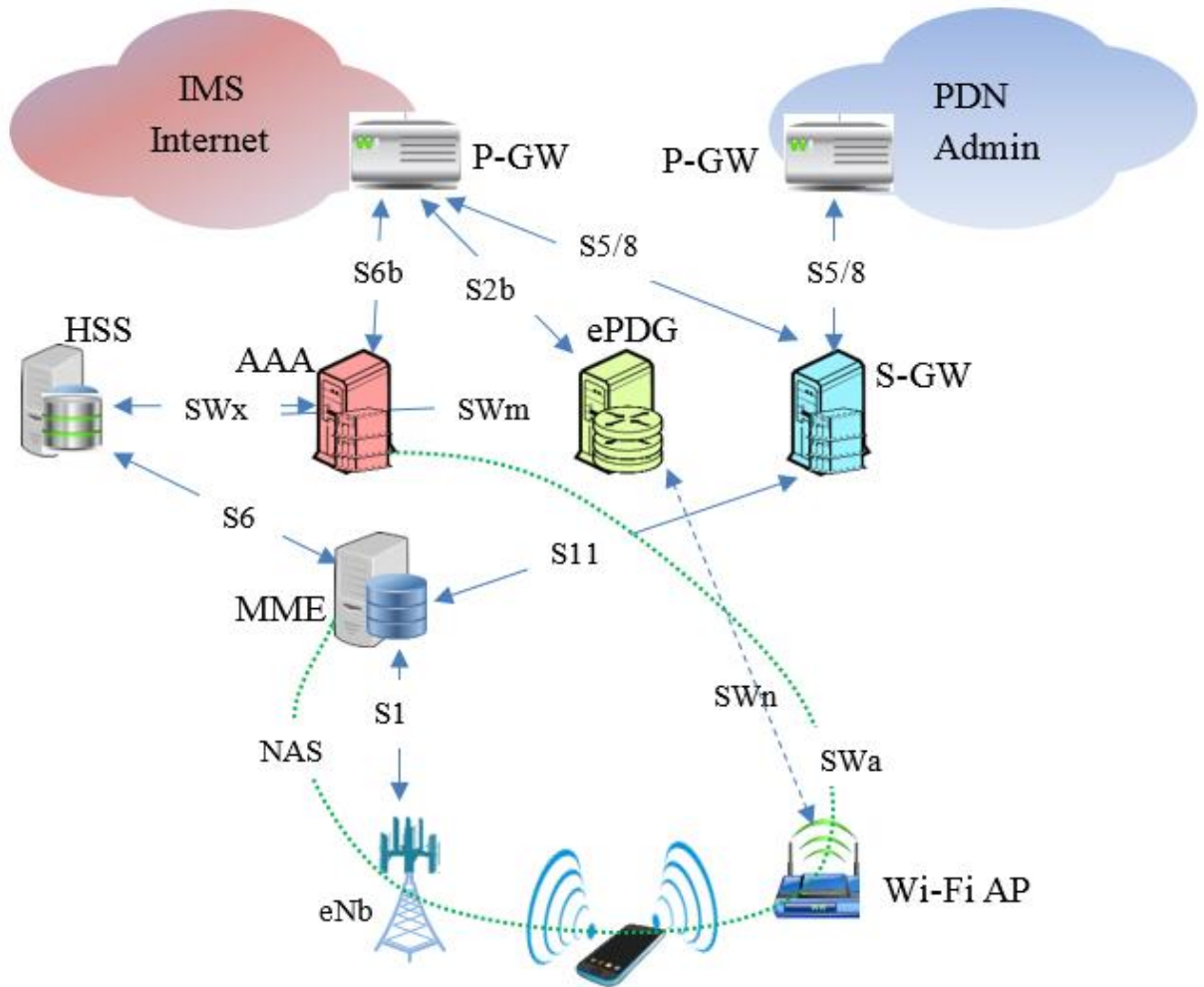


Fig. 11. Interfețele rețelei LTE

#### 1.2.5. E-UTRAN si E-UTRA

Unul din obiectivele cheie ale tehnologiei LTE este furnizarea de rețele cu auto-optimizare (SON), pentru obținerea celor mai bune performanțe în rețea, într-un mod rentabil. Tehnologia LTE folosește drept rețea de acces o rețea de eNodeB-uri. Rețeaua E-UTRAN răspunde de funcțiile radio de mai jos:

- Gestionarea resurselor radio (RRM)
- Compresia antetului
- Securitate
- Conectivitate la EPC

Există diferite straturi de protocol în E-UTRA:

- Controlul Resurselor Radio (RRC - Radio Resource Control) - gestionează informațiile despre stratul de acces și transportul mesajelor stratului NAS (*Non-Access Stratum*), *paging*, stabilirea și eliberarea conexiunii RRC, gestionarea securității, măsurătorile UE legate de sistem, mobilitate, QoS.
- *Packet Data Convergence Protocol* (PDCP) - asigură transportul datelor cu protecție pentru criptare și integritate.
- *Radio Link Control* (RLC) - Acesta poate oferi corecția erorilor ARQ (*Automatic Repeat-reQuest*), segmentarea / concatenarea PDU (*Protocol Data Unit*), reordonarea pentru livrarea în secvență, detectarea duplicatelor etc.
- *Medium Access Control* (MAC) - oferă un set de canale logice către subnivelul RLC, care le multiplexează în canale de transport de nivel fizic. De asemenea, gestionează corecția erorilor HARQ (*Hybrid Automatic Repeat-reQuest*), prioritizarea canalelor logice pentru UE, programarea dinamică între UE, etc.
- Nivelul fizic (*Physical Layer*) - transportă toate informațiile din canalele de transport MAC prin interfața radio. Se ocupă de adaptarea legăturii (AMC), controlul puterii, căutarea celulelor (pentru sincronizarea inițială și *handover*) și alte măsurători (în interiorul sistemului LTE și între sisteme) pentru nivelul RRC.

### 1.3. Sumarul capitolului

Acest capitol a adus în discuție evoluția tehnologiei LTE care a fost analizată detaliat și s-a axat pe o cronologie care a cuprins toate versiunile de la *Release 8* până la *Release 12*. Totodată s-au menționat și îmbunătățirile aduse de la o versiune la alta. La fiecare versiune s-au consemnat cerințele formulate de organizația ITU precum și în ce măsură aceste cerințe au fost îndeplinite sau chiar depășite pe alocuri, ca în cazul *Release 10*. Au fost subliniate caracteristicile legate de agregarea purtătoarelor, suportul pentru configurații multi-antenă, atașarea terminalelor la celulă, eliminarea interferențelor și facilitatea pentru *relaying*. Au fost menționate îmbunătățirile aduse de către *Release 11* și *12*, atât pentru direcția *uplink* cât și pentru cea de *downlink*. Cele mai importante sunt coordonarea multi-punct a transmisiei și recepției, eficientizarea agregării purtătoarelor, eICIC, al canalului *downlink* de control, îmbunătățiri pentru SON și pentru comunicația de tip mașină. Pentru *downlink* trebuie menționate posibilitatea 8C-HSDPA și transmisia multiflux, iar pentru *uplink* funcția NetLoc, posibilitatea renunțării la MSISDN, SRVCC și *reverse SRVCC*, și *handover*-ul apelurilor video către rețeaua 3G. Totodată au fost aduse în discuție politicile *Release 11*, serviciile de urgență de nouă generație, echilibrarea cu ajutorul WiFi, îmbunătățirile aduse asupra interceptării legale și adăugarea de noi benzi de frecvență.



## 2. Ingineria traficului în rețele de acces inter-modale

Pentru cercetările aplicative prezentate în acest capitol, am extins baza experimentală prezentată în Introducere cu o *platformă de ingineria traficului* centrată pe Sistemul "All IP" Ixia XM2 "Optixia - IP Performance Tester" (paragraful 2.1).

În continuare (paragraful 2.2) am efectuat o analiză asupra unor posibilități de direcționare a traficului între sub-rețele de comunicații mobile 3G și 4G.

Pornind de la aceasta, am propus în continuare soluții de echilibrare a traficului aplicând o serie de algoritmi de repartizare a încărcării celulelor radio.

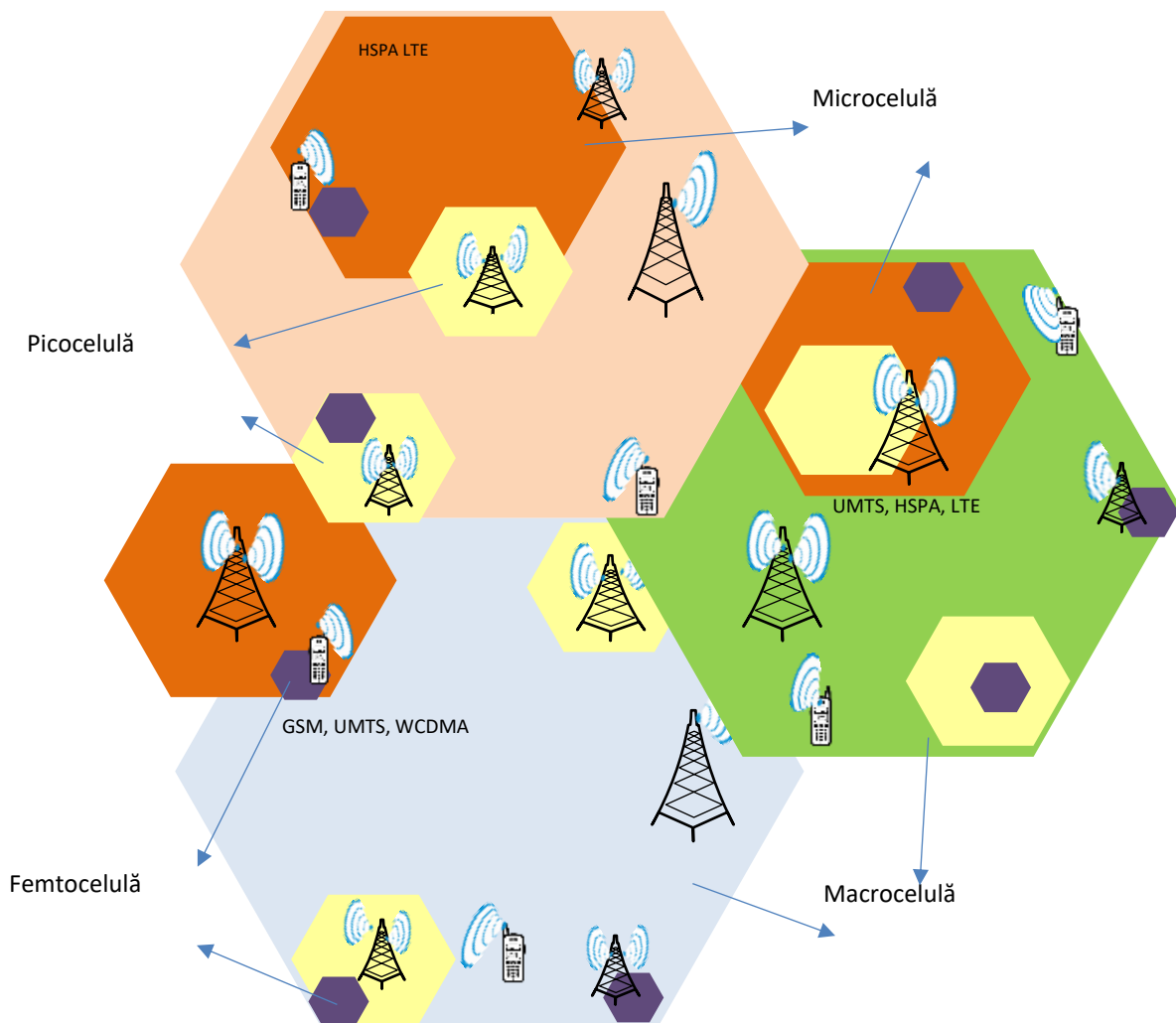


Figura 20. Infrastructura unei rețele de telefonie mobilă

Astfel, prin ingineria traficului rețelelor mobile se încearcă optimizarea direcționării traficului utilizatorilor către o anumită sub-rețea [58], care este disponibilă la momentul creșterii numărului utilizatorilor, pentru transportul serviciilor accesate de aceștia. Dar, prin această procedură apare o supraîncărcare a rețelei de semnalizare și astfel rezultă câteva criterii după care se orientează politicile de coordonare a traficului [59]:

- Utilizarea echilibrată a resurselor de semnalizare;

- Minimizarea comutărilor între sub-rețele;
- Crearea de alternative pentru fluidizarea transmiterii mesajelor de semnalizare.

Aceste criterii depind de politicile de coordonare a traficului utilizatorilor, pe care le poate avea în vedere fiecare operator în scopul creșterii satisfacției abonaților, precum și a îndeplinirii unor deziderate comerciale.

## 2.1. Platforma de ingineria traficului

Pentru *optimizarea alocării resurselor* și validarea tehnicilor de replanificare radio propuse în acest capitol, dar și pentru o serie de alte experimente complexe descrise în capitolele 4, 5 și 6, am dezvoltat și integrat (în infrastructura de telecomunicații al facultății de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor) o *platformă de ingineria traficului* ce reprezintă

- un mediu de testare în condiții de exploatare ("*load & stress*") dar și
- un demonstrator pluri-valent validat în multe din articolele proprii.

Echipamentul de bază al platformei este *Optixia XM2 – IP Performance Tester*, un simulator



Sasiul Optixia XM2

produs de Keysight, care poate testa încărcarea și performanțele unei rețele din punct de vedere "*all IP*" – la toate nivelele stivei OSI. Șasiul XM2 dispune de 2 slot-uri în care se pot instala diferite plăci (*Gigabit Ethernet, Packet over SONET, ATM, r10 Wideband Radio* ș.a.m.d.) care pot funcționa cu viteze de până la 100 Gbps. Aceste module oferă interfețe și resurse pentru aplicații de date, voce și video.

Funcționalitatea Optixia se bazează pe două aplicații: *IxNetwork* (pentru *Layer 2-3*) și *IxLoad* (pentru *Layer 4-7*) care permit o analiză în profunzime atât "*low level*" cât și aplicații de nivel 7 OSI, servicii *rich-media*, QoS, debit informațional, scenarii de mobilitate și voce prin LTE (VoLTE). *IxLoad* poate simula componentele eNodeB și EPC, inclusiv protocoalele și interfețele folosite pentru comunicația între blocurile acestora.

*IxLoad* permite operatorilor și producătorilor de echipamente să testeze și să valideze atât componente ale rețelelor de telefonie mobilă cât și mici rețele complete, având ca scop creșterea calității serviciilor. Aplicația poate testa și simula echipamente LTE în condiții reale creând trafic de voce și de date. În același timp ea simulează diferite acțiuni posibile ale abonaților, inclusiv cazuri de congestie, spre exemplu atașări și detașări (finalul unei pene de curent care duce la un *attach storm*), *handovers* intra și inter-eNodeB (zona de birouri dens populată cu uz intens de *smartphone*, universități), actualizarea permanentă a locației terminalului și diferite tranziții (traficul pedestru, subteran sau pe autostradă al abonaților la ore de vârf) pentru terminale în stare activă sau inactivă.

Printre capabilitățile de modelare se pot număra reflexiile semnalului, atenuări, celule congestionate și *handovers* realizate atunci când abonatul se deplasează cu viteze diferite (pedestră, vehicul, tren, avion la aterizare). IxLoad suportă protocoalele GTP-C și GTP-U.

## 2.2. Metodele propuse pentru repartizarea traficului

Metodele folosite pentru ingineria traficului în rețelele 3G și 4G, care se bazează pe modul de încărcare al purtătoarelor și pe capacităților de trafic ale acestora, se pot clasifica în două categorii: statice și dinamice. Prin aceste metode, traficul utilizatorilor poate fi îndrumat pe sub-rețele diferite, folosind tehnici predefinite, respectiv tehnici bazate pe măsurători în timp real, cu supravegherea raportului semnal-zgomot (*Signal to Interference plus Noise Ratio*) [66].

### 2.2.1. Metoda tehnicilor aleatoare

Această metodă folosește o distribuție aleatoare a abonaților pe câte o sub-rețea. Astfel nu va fi necesară obținerea unor informații care să preleveze volumul de trafic din rețea. Din acest punct de vedere metoda tehnicilor aleatoare este considerată o metodă statică.

### 2.2.2. Metoda “Tehnicilor echilibrate” (TE)

Spre deosebire de metoda tehnicilor aleatoare, această metodă este folosită de unii operatori de rețele mobile care repartizează un număr stabil de abonați spre o sub-rețea. Pentru a suporta diferite volume de trafic care pot surveni cu diferite ocazii, se folosește această metodă care poate anticipa un echilibru în ceea ce privește încărcarea traficului pe sub-rețele cu capacități inegale cunoscute. Având în vedere repartizarea dinainte stabilită, și această metodă este statică.

### 2.2.3. Metoda evitării congestiei (EC)

Problema congestiei traficului poate surveni întâmplător, caz în care cele două metode statice se dovedesc ineficiente. Pentru evitarea congestiei, se poate determina încărcarea sub-rețelelor și față de volumul de trafic instantaneu, utilizatorii vor fi distribuiți dinamic pe sub-rețeaua cu cel mai mic risc de congestie.

Folosind o formulă bazată pe raportul dintre numărul abonaților unei sub-rețele și capacitatea acesteia, încărcarea instantanee se poate scrie ca: [61]

$$I = \underset{R_i}{\operatorname{argmin}} \frac{N_{R_i}}{C_{R_i}}$$

arg min este calculat cu parametrii de mai jos:

- $N_{R_i}$  = numărul utilizatorilor sub-rețelei  $R_i$ ;
- $C_{R_i}$  = capacitatea sub-rețelei;
- $R_i$  = gama sub-rețelelor disponibile

### 2.2.4. Metoda traficului mediu (TM)

Această metodă presupune efectuarea unei analize a parametrilor de capacitate și încărcare a sub-rețelelor înainte ca un abonat să obțină servicii de la aceasta, efectiv o simulare a capabilităților sub-rețelelor ajustată pentru fiecare nou abonat care solicită servicii.

În funcție de aceștia se decide sub-rețeaua pe care acesta va fi ghidat. În aceste condiții debitul de trafic mediu al utilizatorului se poate determina cu formula: [61]

$$Tr_{med} = \frac{S_{Tr_{max}}(S_{a_i})}{N_{R_i} + 1}$$

unde

- $Tr_{med}$  = debitul de trafic mediu al utilizatorului conectat pe sub-rețeaua  $R_i$  ;
- $S_{a_i}$  = SINR-ul utilizatorului;
- $S_{Tr_{max}}$  = funcția care descrie debitul de trafic al abonatului față de SINR lui pentru o sesiune

### 2.3. Modelarea direcționării traficului

Direcționarea traficului se poate face în funcție de sub-rețea (sau tehnologie) și se folosește un proces Markov [62]. În domeniul rețelelor de telecomunicații se află procesele Markov cu spațiul discret de stări.

În această categorie se încadrează procesele a căror variație aleatoare are loc astfel încât fiecare dintre stările  $S_j$  succesive, nu depinde decât de starea precedentă.

Presupunem două tehnologii T1 și T2 între care analizăm direcționarea traficului.

Probabilitatea ca o sesiune să se desfășoare pe o sub-rețea se poate traduce în raportul:

$$X = \frac{D}{A}$$

unde

- $D$  = debitul informational, aparține de sub-rețea;
- $A$  = mărimea în biți a apelului, are valori aleatoare într-un interval știut

Astfel, probabilitatea de stare se poate exprima ca fiind [61]:

$$S_{x,y} = S_x \cdot S_y$$

$$\text{unde } S_x = \frac{\left(\frac{\beta_1 - \alpha_1}{\beta_1}\right) \cdot \left(\frac{\alpha_1}{\beta_1}\right)^x}{1 - \left(\frac{\alpha_1}{\beta_1}\right)^{N_{G3} + 1}} \quad \text{și} \quad S_y = \frac{\left(\frac{\beta_2 - \alpha_2}{\beta_2}\right) \cdot \left(\frac{\alpha_2}{\beta_2}\right)^x}{1 - \left(\frac{\alpha_2}{\beta_2}\right)^{N_{LTE} + 1}}$$

Capacitatea medie consumată de un abonat se traduce ca fiind capacitatea medie a unei stări raportată la  $S_{x,y}$ .

$$C_{P_1} = \sum_{x=1}^{N_1} \sum_{y=1}^{N_2} S_{x,y} \cdot \frac{D_1}{x}$$

În funcție de locul unde se află abonatul în celulă, rata de bit de care acesta beneficiază se schimbă. Astfel, se poate aproxima probabilitatea de a dispune de rata de bit  $r$  în sub-rețeaua 1 ca fiind [61]:

$$P(C_{P_1} = r) = \sum_{x=1}^{N_1} \sum_{y=1}^{N_2} S_{x,y} \cdot f(xr)$$

Acest model teoretic poate fi folosit și la metodele descrise anterior. Spre exemplu, pentru metoda aleatoare există un singur  $\alpha$ . Pentru algoritmul TE este nevoie de mai multe valori ale lui  $\alpha$ . [61]

## 2.4. Simularea probabilităților de accesare

Scenariul ales urmărește modelul Okumura [63] al unei rețele reale aflată în exploatare în care distanța medie dintre situri este de până la 1km.

Se consideră două sub-rețele, cea "superioară" LTE la frecvența de 1.8GHz și cea "inferioară" 3G cu frecvența de 900 MHz.

Se consideră că SINR fiecărui abonat nu variază semnificativ deoarece se presupune că aria în care abonații se deplasează este redusă. Toate testele au fost făcute cu MIMO 2x2. Toate terminalele abonaților suportă ambele tehnologii, 3G și 4G.

În simulările prezentate mai jos, înregistrările abonaților pe celulă sunt generate conform unei distribuții Poisson [64]. Valorile SINR ale abonaților sunt extrase dintr-o distribuție SINR care diferă în funcție de scenariul de simulare ales.

Am folosit platforma de ingineria traficului bazată pe echipamentul *Optixia IP Performance Tester*, descris în capitolul 2.1.

## 2.5. Rezultate

### 2.5.1. Comparație între modelul teoretic și rezultatele simulării

S-a simulat debitul de trafic în Mbps a metodelor statice, în funcție de încărcarea posibilă a celulei. Pentru un trafic cât mai complex au fost introduse în simulare 3 servere (RTSP, http, FTP):

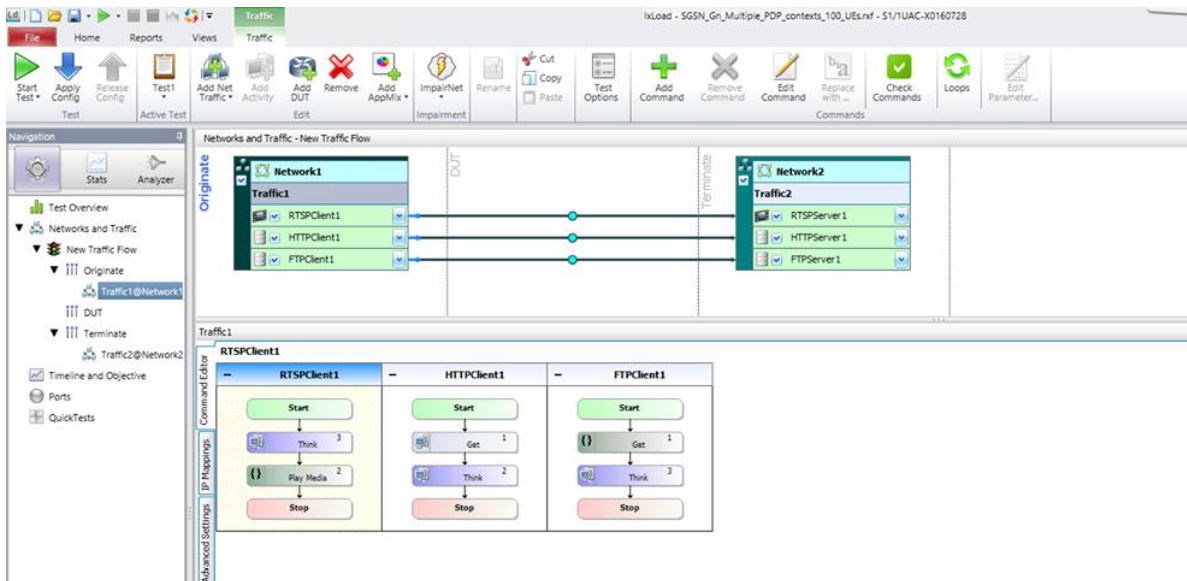


Fig. 22. Simulare cu servere RTSP, HTTP și FTP

Rezultatele concretizate în graficele 3G-A și 4G-A, indică traficul realizat de tehnologiile 3G și 4G atunci când se folosește metoda aleatoare. Meoda TE este vizibil mai bună față de cea aleatoare. Motivul pentru care metoda aleatoare nu-și poate îmbunătăți rezultatele constă în diferența de viteză de date oferită de 4G în comparație cu 3G. La același debit informațional, rețeaua 4G oferă o capacitate sporită față de cea 3G care nu poate suporta același număr de abonați. Se poate observa și faptul că există o apropiere semnificativă între rezultatele experimentale și cele teoretice (figura 24).

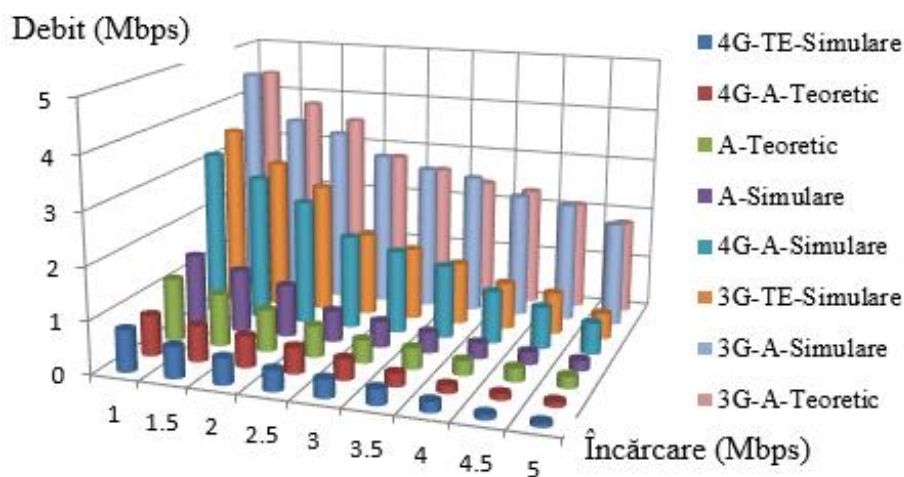


Figura 24. Comparație între studiul teoretic și rezultatele experimentale pentru debitul de trafic în funcție de încărcarea pe celulă pentru metodele statice.

Următorul test s-a concentrat asupra transferului pe direcția *downlink* dintre 400 de abonați și un server FTP (fig. 25, 26). Pentru că simularea să fie cât mai apropiată de realitate, serverul FTP a conținut 1000 de fișiere de mărimi diferite între 10kb și 75Mb. Pe durata testului, terminalele care au descărcat fișierele mai mici au făcut acest proces într-un mod repetat și nu s-au oprit după ce au descărcat doar o iteratie. Acest test a simulat 400 de abonați și a durat 630 de secunde.

Și în acest test se observă faptul că metoda TE se dovedește mai eficientă decât cea aleatoare.

S-a ales o limită de încărcare a celulei de 3Mbps deoarece rezultatele simulării devin imprecise atunci când încărcarea sistemului depășește această valoare, din cauza limitării reale a 3G.

Dacă se dorește o încărcare mai mare de 3Mbps nu se recomandă folosirea modelului teoretic, chiar dacă viteza de 7.2 Mbps este considerată a fi suportată de 3G.

Se poate trage concluzia că rezultatele din teren se apropie mult de rezultatele modelului analitic. Metoda TE a avut rezultate mai bune și astfel, va fi folosită drept etalon în testele de mai jos.

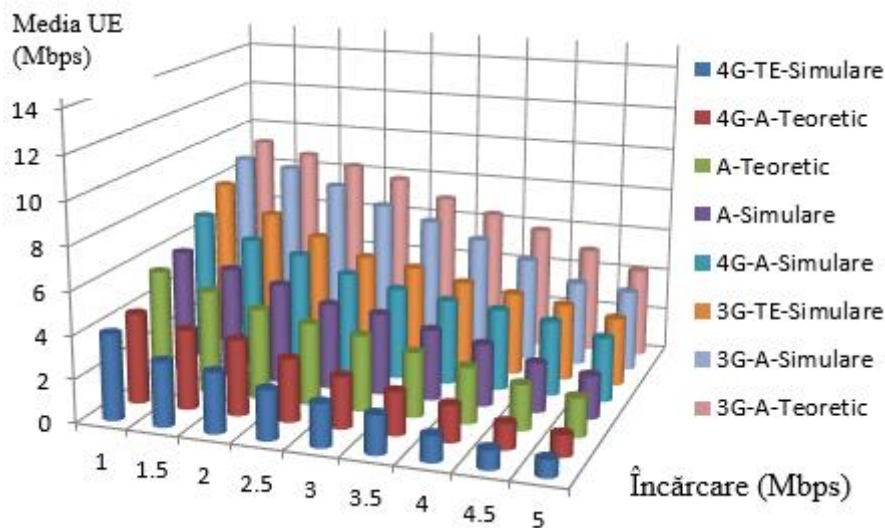


Figura 27. Comparație între studiul teoretic și rezultatele experimentale pentru debitul de trafic *download* în funcție de încărcarea pe celulă pentru metodele statice.

### 2.5.2. Comparație între metodele evitării congestiei și cea a traficului mediu, raportate la metoda TE

Simularile următoare au fost executate cu aceleași teste de trafic descrise în capitolul anterior.

În figura 28 se observă că metodele dinamice, EC și TM, au rezultate mult mai bune comparativ cu metoda TE, mai ales când viteza depășește 4-5 Mbps, ceea ce se traduce în capacitate satisfacatoare doar la o distanță redusă, aproape de (e)NodeB.

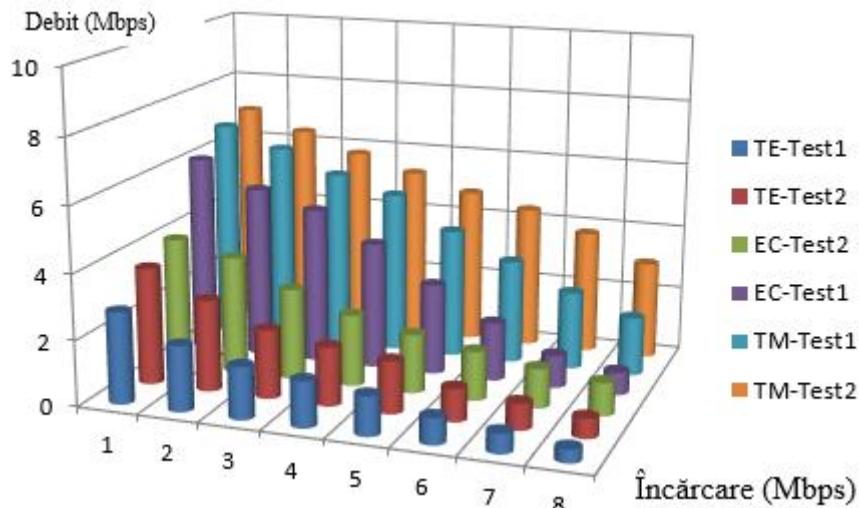


Figura 28. Debitul abonatului, în funcție de încărcarea pe celulă

Metodele dinamice reușesc să ofere un debit de date acceptabil care are loc să crească în cazul creșterii numărului de cereri de conectare.

În intervalul 0-4 Mbps, metodele dinamice au rezultate apropiate, diferența apărând peste capacitatea de 4 Mbps, unde metoda traficului mediu are rezultate vizibil mai bune, aproape dublate când se depășește pragul de 6.5 Mbps.

În aceeași direcție, am comparat debitele celor 2 sub-rețele, în funcție de SINR, considerând testul de *download*, pentru a demonstra diferența dintre ele și concluziile care se impun.

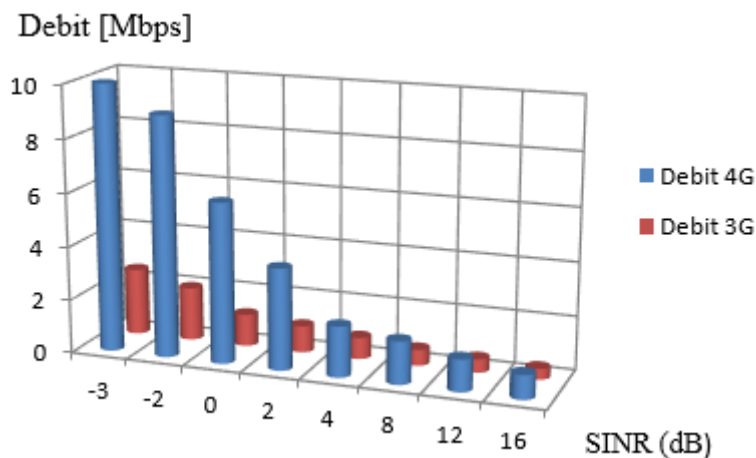


Figura 29. Câștigul în debit 4G comparativ cu cel al 3G

Cu cât SINR este mai nesemnificativ, cu atât traficul 4G este mai mare (de aproximativ 5 ori) și viceversa. De aici se poate trage concluzia că metoda TM împinge abonații cu SINR mic către sub-rețeaua 4G iar pe ceilalți, către 3G. Criteriul ales, conform graficului, este centrat în jurul debitului informațional. Trebuie însă avut în vedere faptul că diferența vizibilă în grafic depinde de fiecare operator în parte și de capacitățile și caracteristicile fiecărei rețele. Cu cât diferența aceasta este mai pronunțată, cu atât mai puternic devine posibilul câștig al metodei traficului mediu față de cea a evitării congestiei.



## 2.6. Impactul trecerii la 4G asupra debitului

Pentru studiul câștigului obținut al debitului de trafic în cazul metodei TM față de metoda TE, am considerat trei cazuri:

- Folosind lărgimea de bandă de 5MHz, în sub-rețelele 3G și 4G, am impus o încărcare de 2Mbps.
- Folosind lărgimea de bandă de 5MHz, în sub-rețelele 3G și 4G, am impus o încărcare de 5Mbps.
- Am impus o încărcare de 4Mbps pentru sub-rețeaua 3G într-o bandă de 10MHz (*Evolved HSPA* sau 3.75G) și pentru sub-rețeaua 4G într-o bandă de 5MHz.

Astfel am obținut diferențele debitului de trafic în cazul folosirii metodei TM față de metoda TE, unde inițial numai jumătate din utilizatori pot folosi sub-rețeaua 4G, iar la final toți abonații pot comuta pe 4G.

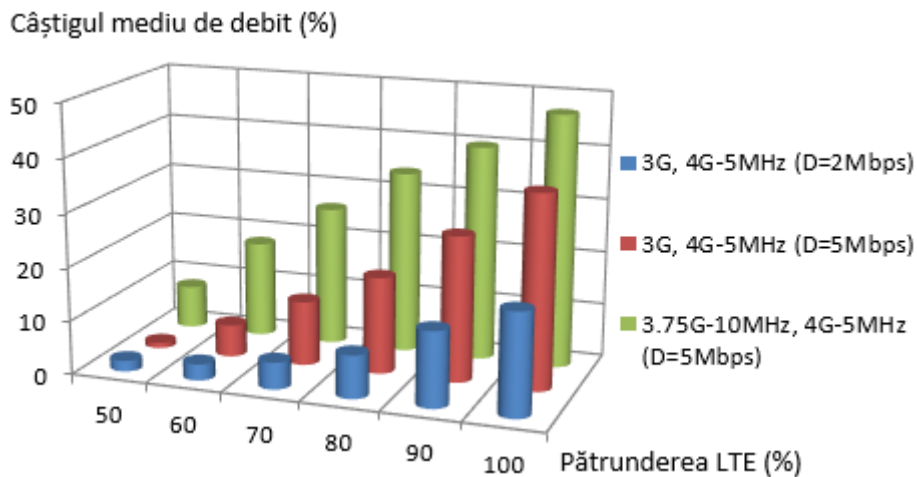


Figura 30. Debitul de trafic raportat la pătrunderea LTE folosindu-se metoda traficului mediu față de metoda "tehnici echilibrate".

În consecință, la o capacitate LTE de maximum 45%, metoda TE livrează aceleași performanțe ca metodele dinamice.

Peste o capacitate de 65-70% se poate folosi o metodă mai avansată, dar aceasta depinde și de condițiile oferite de rețeaua operatorului.

În cazul în care sub-rețeaua LTE se extinde și capacitatea LTE crește, atunci se recomandă implementarea unei metode statice deoarece este mai simplu și mai ieftin de implementat și nu aglomerează traficul de semnalizare.

În cazul în care crește capacitatea sub-rețelei 3G care depășește semnificativ sub-rețeaua și capacitățile LTE, este recomandată folosirea unei metode dinamice, pentru evitarea riscului de congestie, în cazul în care acesta apare.

## 2.7. Bruiajul LTE – Studiu de caz asupra dronelor

Scopul acestui capitol este evaluarea faptului dacă soluțiile comerciale de bruiaj sunt potrivite pentru drone. Am efectuat o analiză spectrală asupra mai multor scenarii de bruiaj pentru a verifica dacă o astfel de soluție este eficientă pentru protejarea unui spațiu împotriva dronelor LTE.

S-a dorit protejarea curții interioare a Corpului T a universității „Transilvania” din Brasov. Semnalul perturbator „anti-LTE” a fost activat într-o cladire imprejmuitoare (aflată la o distanță de 30m față de centrul ariei protejate) și au fost făcute măsurători [75] cu scopul de a determina dacă drona va mai putea fi controlabilă prin rețeaua LTE, odată intrată în zona bruiată (fig. 31.). Eficacitatea bruiajului este indirect proporțională cu distanța.

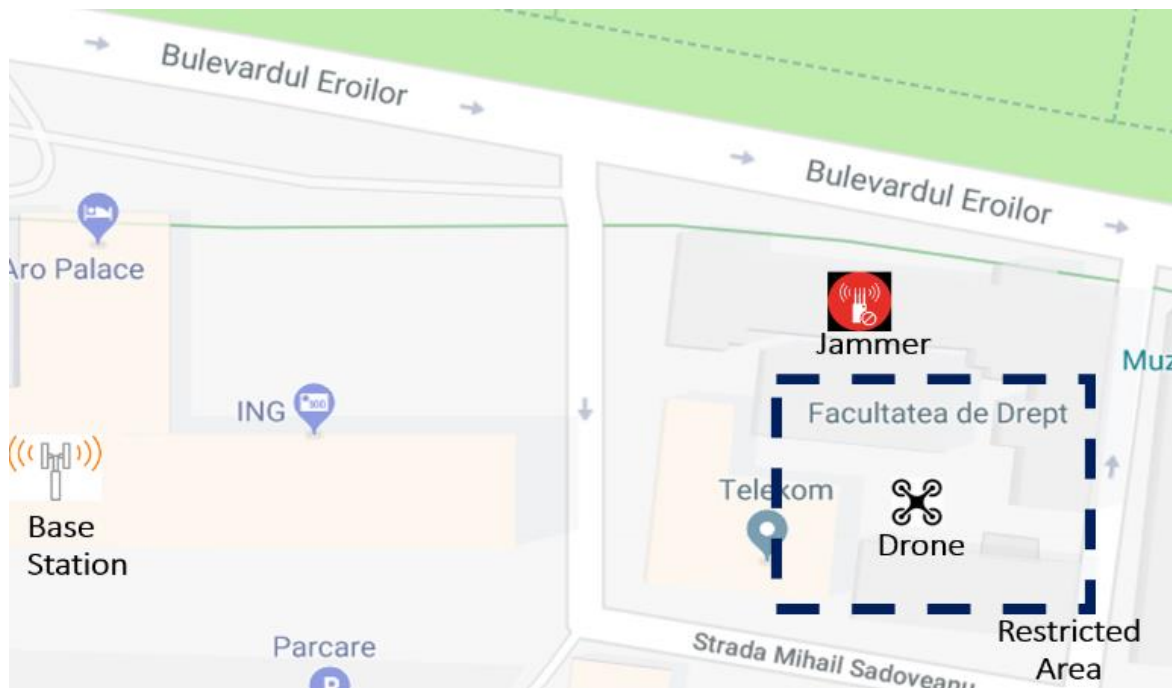


Fig. 31. Harta scenariului

A fost folosit un analizor de spectru cu antene omnidirecționale și Yagi. Testele au vizat semnalele a doi operatori și au fost capturate cu antene Yagi. În figura 31 apare doar un eNodeB care se afla la aproximativ 140m distanță. Au fost studiate influențele perturbatoare provenite de la semnale din benzile 880-950 MHz și 1780-1820 MHz (pentru cei doi operatori).

### 2.7.1. Configurația propusă

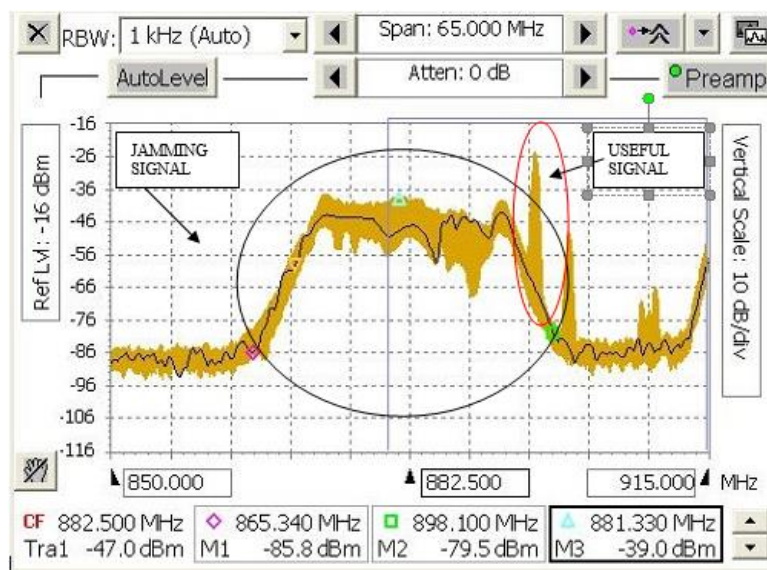
Cele mai utilizate antene în măsurătorile de pe teren sunt cele sectoriale cu deschidere de 65° în planul orizontal și cu câștig între 10 și 18 dBi, cum ar fi antenele Kathrein, HyperLOG și Yagi.

Pentru a stabili influența semnalelor care pot afecta spectrul LTE s-a folosit analizorul spectral Tektronix Y400 [80] în diferite locații. Pentru aceste măsurători am conectat ambele antene, cea omnidirecțională și cea Yagi, la analizor. Antena Yagi a fost îndreptată către cel mai

apropiat eNodeB al fiecărui operator, folosind polarizarea orizontală și verticală, iar direcția a fost determinată de nivelul măsurat al puterii semnalului în dB.

### 2.7.2. Evaluarea prin analiză spectrală a soluției propuse

Figura 36 descrie impactul semnalelor perturbatoare *uplink* pentru ambii operatori mobili. Generatorul de bruijaj TSJ-4G-8081 a emis un semnal de tip "zgomot" în benzile 880-950 și 1780-1820 MHz. Frecvențele perturbatoare au fost măsurate cu analizorul echipat cu antena omnidirecțională. Spectrul semnalului perturbator se găsește între 865-898 MHz și afectează o parte a benzii utile *uplink* (880-915 MHz), astfel încât semnalul de bruijaj emis de aparat este recepționat de eNodeB ale operatorilor din zonă (figura 39).



Recomandarea ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) este ca SINR să fie de cel puțin 9dB pentru interferența co-canal astfel încât informația să poată fi extrasă la o calitate suficientă [81].

Semnalul util LTE depășește semnalul perturbator cu mai mult de 9dB, deci comunicația se poate desfășura în condiții bune.

Dacă diferența dintre semnalul util și cel perturbator scade sub acest prag, atunci comunicația se poate întrerupe (*drop-call*). Acesta a fost pragul considerat în experimentul efectuat pentru a considera dacă semnalul util este bruiat sau nu.

Pentru curtea interioară studiată, s-a concluzionat că a fost "izolată" eficient de posibilitatea controlării dronei prin rețelele comerciale LTE.

Distanța a fost de aproximativ 45m de perturbator iar aceasta poate fi extinsă până la 60m. Zona protejată era supusă deja unor perturbații datorate cladirilor înalte înconjurătoare, și a altor antene comerciale, fapt care a ajutat la bruijaj.

## 2.8. Sumarul capitolului

Scopul acestui capitol a fost găsirea unor soluții viabile pentru *optimizarea alocării resurselor* concretizate într-o serie de tehnici de *replanificare radio*. O primă contribuție – dezvoltată pentru validarea soluțiilor de echilibrare a încărcării traficului rețelelor mobile (dar și pentru infrastructura cercetărilor prezentate în continuare – mai ales în capitolul 5) a constat în dezvoltarea și integrarea unei *platforme de ingineria traficului*.

În analiză sunt incluse aspectele folosirii rețelelor vechi și costul implementărilor, ținându-se cont de integrarea LTE, volumul de trafic și capacitățile LTE ale abonaților. Capitolul a propus patru metode de coordonare a traficului între sub-rețelele 3G și LTE cu scopul de a maximiza rata de transfer sau a debitului de trafic la nivelul abonatului. Aceste patru metode sunt metoda aleatoare, metoda „tehnici echilibrate”, metoda evitării congestiei și cea a traficului mediu. Au fost enunțați o serie de parametri (debitul mediu al fiecărui utilizator, încărcarea și capacitatea rețelei ș.a.m.d.), cu ajutorul cărora s-a urmărit o creștere cât mai bună a metodelor menționate anterior. Analiza a presupus două tehnologii, sau “sub-rețele”, între care este efectuată echilibrarea traficului, una de 3G și cealaltă de 4G. Simularea a fost realizată cu echipamentul *Optixia IP Performance Tester* cu care am injectat trafic de date de mai multe tipuri (HTTP, RTSP, FTP) și a acoperit mai multe unghiuri: între rezultatele teoretice și cele din urma simulărilor, între metodele descrise anterior, și o comparație între cele două tehnologii din punct de vedere al câștigului în debit. Ultima analiză a studiat trei cazuri în care diferă lărgimile de bandă și încărcările pe sub-rețele. Analiza a urmărit și proporția de integrare a sub-rețelei 4G în contextul întregii rețele mobile a unui operator.

Am demonstrat că metodele dinamice prezintă avantaje doar când ponderea 4G depășește nivelul de 65-70% din numărul abonaților. Sub acest nivel, se observă faptul că metoda „tehnici echilibrate” oferă rezultate la fel de bune ca metodele dinamice.

În concluzie se poate afirma că metoda de direcționare a traficului aleasă depinde în cea mai mare parte de nivelul de integrare 4G. Atunci când acesta este mare, se recomandă folosirea metodelor dinamice deoarece ele pot detecta încărcarea pe celulă la un moment dat, iar în caz contrar, simpla direcționare a tuturor abonaților cu capacitatea 4G către sub-rețeaua cu același nume este suficientă, această metodă fiind și mai ușor de implementat.

De asemenea, mergând în direcția *load & stress*, am abordat studiul traficului dintr-o perspectivă opusă, ținând cont de dezvoltarea explozivă a dronelor (UAV) cu capacitate LTE. Acest lucru se poate exemplifica prin închiderea aeroportului britanic Gatwick (cel mai aglomerat aeroport cu o singură pistă din lume, până în 2017 și al doilea cel mai aglomerat aeroport din Regatul Unit) datorită unei drone care a pătruns în mod neautorizat în spațiul aerian respectiv. În consecință, am considerat util un studiu asupra posibilităților de bruijaj, ca o măsură de apărare împotriva acestora. În urma unei analize spectrale efectuată asupra a două rețele comerciale, am concluzionat că bruijajul este eficient la distanțe scurte, de până la 60m, distanța reprezentativă pentru spații private. Măsurătorile sunt afectate de altitudinile dronei și a aparatului de bruijaj dar și de perturbările caracteristice zonei urbane de care s-a ținut cont în analiză. Am confirmat recomandarea teoretică a pragului de 9dB care trebuie să fie depășită de către puterea semnalului care bruijază pentru a putea afecta semnalul util folosit la ghidarea dronei.

### 3. Soluții pentru rețele radio definite *software* (SDR)

Acest capitol este dedicat unor echipamente de mare modernitate – “Radio Definite *Software*” (SDR – *Software Defined Radio*).

Pentru cercetările în domeniul SDR pentru LTE, am folosit o serie de echipamente USRP (*Universal Software Radio Peripherals*) integrate cu

- *software* din sursă deschisă
  - openLTE (3GPP / GNU Radio)
  - srsLTE (*Software Radio Systems*) [82]
- *software* specializat *National Instruments / Ettus Research* – unificat cu suita LabVIEW (pentru sistemele USRP B210)

Soluțiile elaborate pentru controlul SDR au avantajul de a putea fi abordate în medii integrate de dezvoltare (IDE – *Integrated Development Environments*)

Scopul acestor echipamente este să ofere comunicații radio fără a fi nevoie de o implementare pur fizică. Pe scurt, *software*-ul înlocuiește câteva componente *hardware* care în mod obișnuit, s-ar ocupa cu transmisiunile radio.

Nevoia de astfel de echipamente provine din creșterea vertiginoasă a volumului de operații desfășurate prin intermediul comunicațiilor mobile. În ziua de astăzi comunicațiile presupun transport de voce, date de mărimi și debit diferite, mesaje de tip *broadcast*, comunicații de control și de urgență șamd, astfel încât este nevoie ca echipamentele să fie cât mai versatile. Însă odată cu posibilitățile de schimbare a funcțiilor, costul acestor echipamente crește. În acest context, tehnologia SDR oferă atât flexibilitate cât și un bun raport calitate-preț pentru susținerea comunicației mobile.

#### 3.1. Concepte SDR

Conform definiției date de forumul *Software Defined Radio*, în colaborare cu Institutul de Inginerie Electrică și Electronică (IEEE), SDR reprezintă “*Echipamente radio în care câteva, sau toate funcțiile stratului fizic sunt definite software*”. Un dispozitiv radio este un echipament care poate transmite și recepționa pe cale aeriană semnale în frecvențele radio care fac parte din spectrul electromagnetic, cu scopul de a transmite informația [83].

#### 3.3. Rețeaua LTE cu SDN și NFV

Articolul *Cellular Software Defined Network – a Framework* [89] a propus o privire a rețelei LTE dintr-un unghi „virtualizabil”. S-a dorit implementarea SDN și NFV, rezultând o arhitectură a rețelei modificată și denumită CSDN (*Cellular SDN*) ca în fig. 44. Punctul de plecare a fost ca funcționalitățile rețelei să fie preluate de NFV și gestionate de *controller*-ul SDN.

Scopul a fost ca serviciile și resursele rețelei să fie orchestrate cu ajutorul tehnologiilor SDN și NFV, operatorii mobili câștigând la capitolul de granularitate a rețelei.

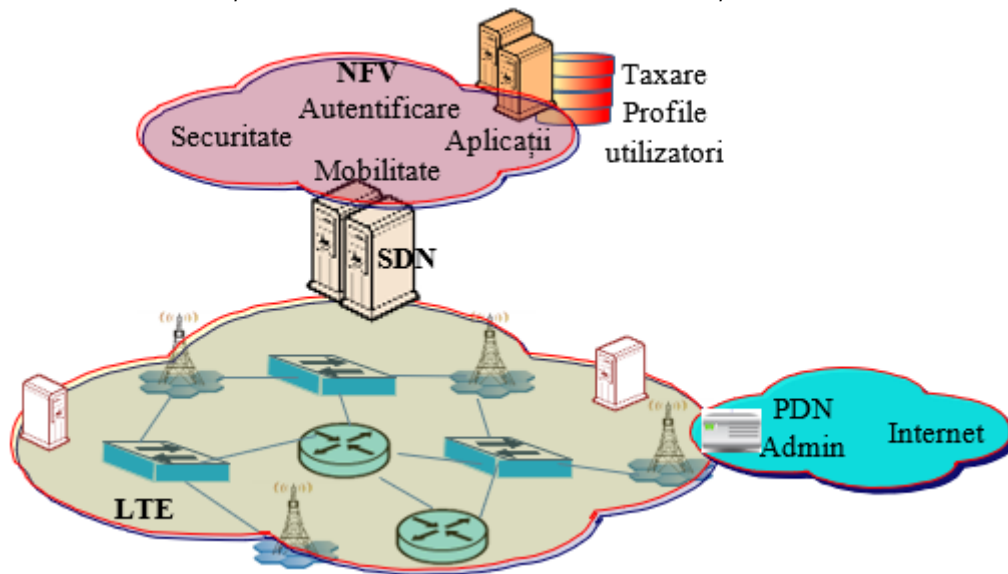


Fig. 44. Arhitectura CSDN

Implementarea NFV, odată cu virtualizarea adusă de aceasta reușește să transforme rețeaua radio de acces într-o rețea *cloud* (CRAN) [90]. Astfel, gestionarea resurselor devine mai eficientă datorită posibilității utilizării infrastructurii *cloud* a operatorului mobil.

În consecință, operatorul poate să folosească un volum mai mare de informație despre abonați și despre starea rețelei cu scopul de a-și optimiza rețeaua și a îmbunătăți calitatea serviciilor, oferind servicii personalizate, dedicate clienților în contextul pe care aceștia și-l doresc. Un astfel de volum de date poate transforma operatorul mobil într-un operator *big data* care va putea să colaboreze cu alți furnizori de servicii pentru a dezvoltă diferite aplicații.

### 3.4. Echipamente și posibilități de aplicații SDR



#### Ettus USRP B210

Echipamentul Ettus USRP B210 a fost utilizat în experimentul de față. A fost ales atât datorită specificațiilor tehnice care vor fi detaliate mai jos, cât și datorită compatibilității sale cu diferite programe *software opensource* ai căror parametri pot fi ajustabili în funcție de necesitatea aplicației folosite. Se pot exemplifica o

serie de aplicații diverse care arată versatilitatea remarcabilă a SDR:

- Scanner de diferite frecvențe radio, inclusiv de "*baby-phone*" pentru a vedea dacă puterea de emisie nu este prea mare;
- Se pot monitoriza comunicații de pe frecvențe radio de către autoritățile de control radio;

- Se pot asculta comunicații de pe frecvențe radio, inclusiv de poliție, pompieri și de turn de control de aeroport;
- Se pot scana frecvențe de telefoane personale sau telefoane fără fir;
- Se pot prelua date de la baloane meteorologice;

Oricare dintre aceste aplicații poate depăși limita legală a țării unde sunt utilizate, deci trebuie ținut cont de acest aspect.

### 3.5. Platforme *software* dedicate SDR

#### GNU Radio

GNU Radio este un program *opensource* care funcționează sub Linux și care permite construcția a diferite aplicații SDR cu ajutorul unor blocuri cu funcții dedicate (filtre, modatoare și demodatoare, codoare și decodoare de voce, egalizatoare șamd). În cazul în care utilizatorul nu dispune de un echipament SDR, GNU Radio îi permite acestuia să simuleze funcționarea respectivelor aplicații SDR și îi dă posibilitatea vizualizării rezultatelor.

#### srsLTE

Aplicația srsLTE reprezintă o implementare LTE care oferă posibilitatea de a simula diferite entități ale unei rețele LTE punând accent pe stratul fizic. srsLTE oferă și posibilitatea de a vedea mesajele capturate în forma decodată. Aceasta aplicație va fi discutată pe larg în capitolul următor deoarece cu ea am realizat experimentul din acest capitol [97].

### 3.6. Integrarea platformei SDR cu sistemul de informatică instrumentală *National Instruments*

Pentru o abordare "de sus în jos" ("*top-down*") orientată pe serviciile de instrumentație virtuală, am pus la punct managementul USRP (*Universal Software Radio Peripherals*) prin intermediul LabVIEW [99]. Odată cu achiziția firmei ETTUS *Research* de către compania *National Instruments* din Statele Unite ale Americii, integrarea aplicațiilor SDR se poate face pe scară largă în sistemul extins de informatică instrumentală. Am pus astfel bazele unei platforme avansate Radio *Software* cu scheme de modulație digitală "IQ programabile" (după denumirea generică a canalelor I și Q ale schemelor radio "în cuadratură" de sub-purtătoare) prin care am extins infrastructura de cercetare a rețelelor de acces (stații de bază și *controllere* dedicate rețelelor radio pentru comunicații mobile). Eficiența economică a soluției implementate constă în această abordare "de sus în jos" prin servicii, a managementului sub-rețelelor radio 4G, un nivel avansat de *controlabilitate dată de programabilitate* ("*software-definition*"). Nu în ultimul rând, am contribuit la extinderea bazei de cercetare aplicativă a ICDT (Institutul de Cercetare-Dezvoltare "Transilvania") care utilizează pe scară largă o licență "de campus" – prin integrarea produselor ETTUS, cel mai prestigios producător de soulții USRP.

Din aceste motive, soluțiile SDR propuse sunt sustenabile, în conformitate cu principiile dezvoltării durabile și, mai ales, cu planul strategic al ICDT. Programabilitatea – Controlabilitatea *Software* ridicată la nivelul sub-sistemelor Radio reprezintă un foarte mare potențial de modernizare, de extindere cu noi soluții originale în domeniul prototipării – cercetării dar și în ceea ce privește dezvoltarea cunoștințelor în acest domeniu caracterizat de cheltuieli investiționale / de operare (CapEx/OpEx) foarte ridicate.

Am obținut un ansamblu complet și funcțional care permite, prin program, alocarea benzilor de frecvențe și parametrizarea schemelor de modulație.

### Sub-sistemul Rx SDR

Din diagrama Rx SDR VI se poate vedea abordarea *orientată pe sesiune* tipică a lanțului de prelucrare niUSRP, cu fluxuri de date în succesiunea ("pipeline") cu tradiționalul mod NI de tratare a erorilor și, mai ales, cu propagarea principalelor meta-date SDR (introduse în blocul niUSRP *Configure Signal*"subVI") prin niUSRP *Initiate*, niUSRP *Fetch Rx Data* și până la blocul niUSRP *Close Session.vi*. După furnizarea CDB WDT (*Complex Double Waveform Data Type*) se trece de la semnalul radio în domeniul timp la blocurile de analiză în domeniul frecvență prin intermediul Fourier Transform (FFT) care permit *deteția "spectrum sensing"* pe baza unor praguri reglabile ("*adjustable level thresholds*"). În figurile de mai jos am ilustrat un emulator de "diversitate spectrală" cu comportament programabil (inclusiv în scenarii de Inteligență Artificială precum cele pe care le-am prezentat în lucrarea [7.3.1.2]. Panoul frontal VI din figura următoare permite sinteza formelor de undă modulate AM cu diverse „tonuri” audio, precum și afișarea reprezentărilor temporale și spectrale ale semnalelor produse.

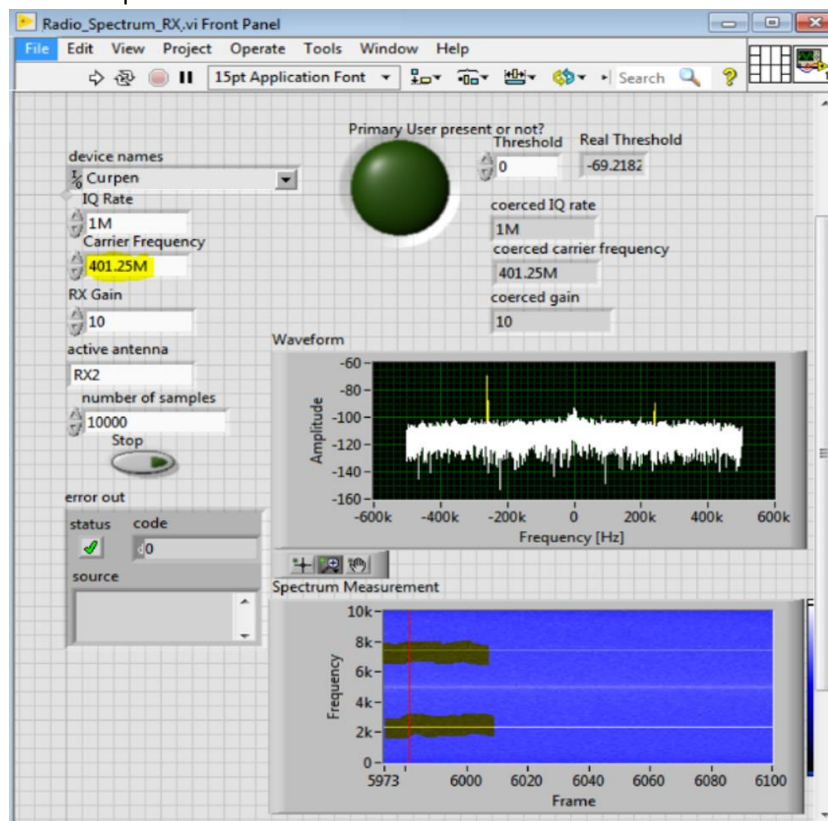


Fig. 45. Panoul frontal al instrumentului virtual pentru recepție, Rx, cu evidențierea purtătoarelor IQ



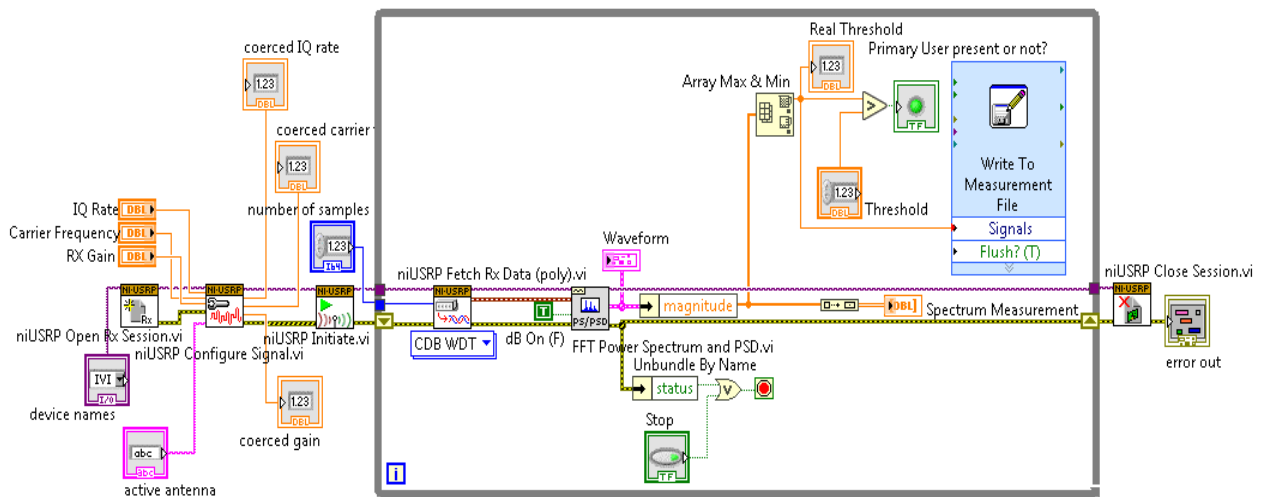


Fig. 46. Părțile principale ale diagramei Rx, centrate pe succesiunea de controale niUSRP "pipeline"

### Sub-sistemul Tx SDR

Pentru coordonarea Rx/Tx USRP B210 include și un sub-sistem FPGA (*Field Programmable Gate Array*) cu *hardware* reconfigurabil, o capabilitate avansată „*edge-computing*” care permite și funcționarea de sine stătătoare („*stand-alone*”), fără un calculator de control extern.

### 3.7. Soluția bazată pe SrsLTE

Aplicația srsLTE (*Software Radio Systems LTE*) reprezintă o suită de programe *software open-source* care reușesc să emuleze cu succes o rețea LTE completă. Acest proiect a dorit să implementeze biblioteci (sau API-uri) referitoare la nivelul stratului fizic al unei rețele LTE. Avantajul principal al acestei aplicații este gradul ridicat de separație între blocurile componente și nevoia scăzută de dependențe externe.

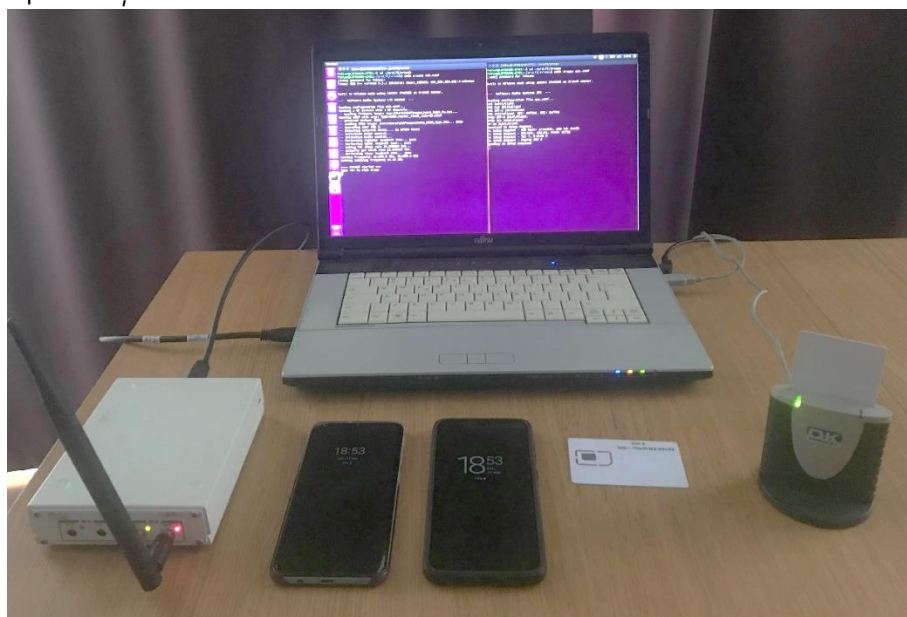


Figura 47. Echipamentele *hardware* folosite

Pentru crearea rețelei virtuale am folosit următoarele (fig. 47):

- Laptop cu microprocesor minim Intel i7 și port USB 3.0 pe care funcționează sistemul de operare Ubuntu 16.04 LTS Xenial Xerus;
- Echipament SDR - Ettus USRP B210 conectat prin USB 3.0;
- Telefoane cu capacitate 4G;
- SIM-uri configurabile care nu aparțin unui operator comercial.

SrsLTE poate fi privit ca fiind alcătuit din trei componente, fiecare dintre acestea reprezentând o parte a unei rețele comerciale LTE. Mai jos ele sunt descrise pe scurt:

- *srsEPC* → reprezintă implementarea unei rețele *core*, practic EPC-ul, de unde și numele pachetului *software*;
- *srsENB* → reprezintă un eNodeB virtual care trebuie să se conecteze la o rețea *core* pentru a crea o celulă LTE funcțională;
- *srsUE* → reprezintă unul sau mai multe terminale mobile simulate de *software*; poate fi privit ca o aplicație care se conectează la rețeaua mobilă.

### 3.7.1. SrsEPC

*srsEPC* este un EPC virtual, sau o rețea *core* simulată *software*. Este de fapt o singură aplicație care înglobează toate blocurile unei rețele *core* LTE funcționale, adică un HSS, un MME, un SGW și un PGW, cu toată funcționalitatea acestora.

- *srsEPC/HSS* – acest bloc se ocupă cu facilitarea parametrilor legați de autentificarea terminalelor mobile și în general de autorizarea accesului acestora în rețea.
- *srsEPC/MME* – acest bloc se ocupă cu comunicația în planul de control între EPC și eNB, cu mobilitatea, cu mesajele de control și cu menținerea legăturii cu terminalele atunci când acestea se află în modul așteptare. Acest bloc oferă suport pentru protocoalele NAS și S1-AP.
- *srsEPC/SGW și PGW* – acest bloc se ocupă cu comunicația în planul utilizatorului dintre EPC și eNodeB-uri, cu ajutorul interfețelor S1-U și Sgi (care conectează PGW cu rețelele de date externe).

*srsEPC* se poate configura cu ajutorul a două fișiere: *epc.conf* (conține informații legate de configurarea blocurilor EPC, adică HSS, MME, SGW și PGW) și *user\_db.csv*. Fișierul *user\_db.csv* reprezintă o bază de date a utilizatorilor care au voie să se conecteze la rețea.

### 3.7.2. SrsENB

*SrsENB* constituie un eNodeB a cărui funcționalitate este implementată complet în *software*.

### 3.7.3. Instalarea srsLTE

Instalarea sub Ubuntu se face în trei pași, prin comenzile *cmake*, *make* și *make install*. Pentru a putea fi acceptat în rețeaua privată, un potențial abonat trebuie să treacă testul de autentificare, adică parametrii din fișierul *user\_db.csv* trebuie să coincidă cu cei scriși pe cartela SIM. În acest scop am folosit cartele neinscripționate pe care le-am programat corespunzător cu ajutorul utilitarului *software SIM Personalize*, fig. 60.

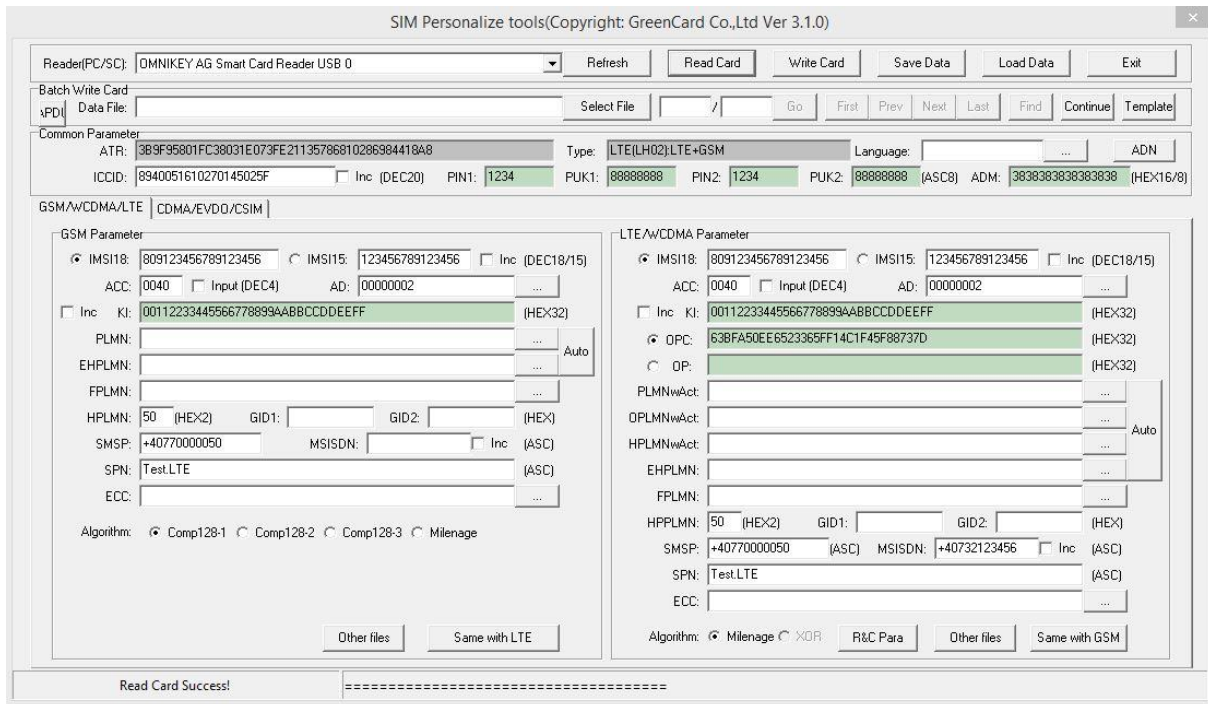


Figura 60. Utilitarul de citire și scriere a SIM-urilor

Rețeaua *core* este activată prin citirea configurației din fișierul *epc.conf*. Camera de lucru a fost ecranată (în niciunul dintre experimente nu au fost provocate bruijaje ale frecvențelor comerciale).

Cei mai importanți parametri de sistem configurați sunt:

- Banda LTE 1 = 2100MHz;
- Lărgimea de bandă = 10 (LTE 1 suportă lărgimi de bandă de 5, 10, 15 și 20 MHz);
- MCC = 001 (*Mobile Country Code*);
- MNC = 01 (*Mobile Network Code* – codul rețelei operatorului);

ENB-ul virtual poate fi pornit prin citirea configurației din fișierul *enb.conf*. Parametrii acestui eNB virtual au fost configurați în fișierul respectiv.

În acest moment rețeaua privată LTE este activă și poate fi găsită pe telefoanele mobile personale. Rețeaua va fi găsită de telefoane prin codurile MCC și MNC, iar în funcție de modelul telefonului acestea vor fi traduse intuitiv prin „Test PLMN 1-1”, „00101”, „Test.LTE” șamd.

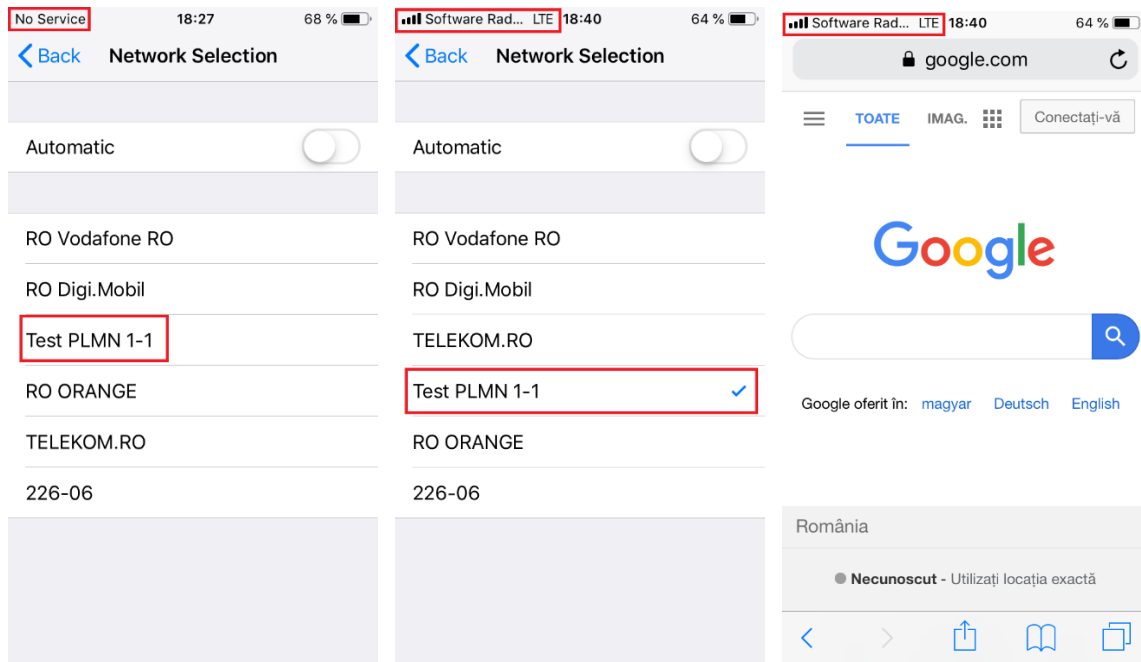


Fig. 63. a), b), c) Conectarea telefoanelor iPhone 6, Oneplus si Samsung A5 la rețeaua privată LTE

La un simplu test de măsurare a vitezei datelor am obținut o viteză de *download* de aproximativ 25Mbps (fig. 66). Viteza ar fi putut fi mai mare, însă există limitări impuse de interfețe în funcție de echipamentele *hardware* folosite.



Fig. 66. Test pentru aflarea vitezei datelor

Configurația implementată permite sesiuni cu funcționalitate LTE completă, apel efectuat prin o rețea privată LTE. Pașii sesiunii vor fi detaliați la nivel de semnalizare. Am pus accent doar pe traseul UE – eNB – MME (adică terminal mobil – antenă – echipament de control) - astfel înregistrările s-au făcut la cele 2 capete: UE și MME.

### 3.7.4. Conectarea la rețea explicată printr-o serie de pași și indicarea acestora în capturi și în Anexă

#### 3.7.4.1. Transmisia informațiilor sistemului

Pentru a obține servicii de la rețea, terminalul are nevoie de identificatorul rețelei, al celei și de capabilitățile radio pentru selectarea rețelei.

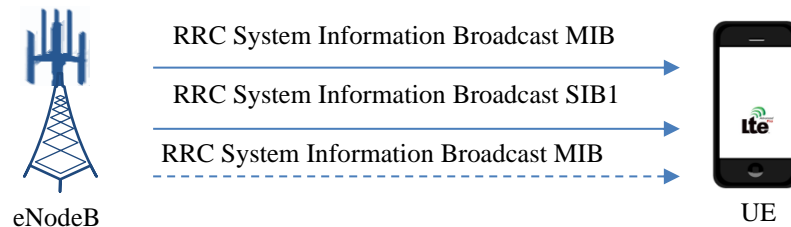


Fig. 67 a,b. Transmisia informațiilor sistemului

#### 3.7.4.2. Ridicarea interfeței S1

Se stabilește interfața S1 între eNodeB și MME, după care MME transmite configurația către eNodeB (fig. 68 a,b).

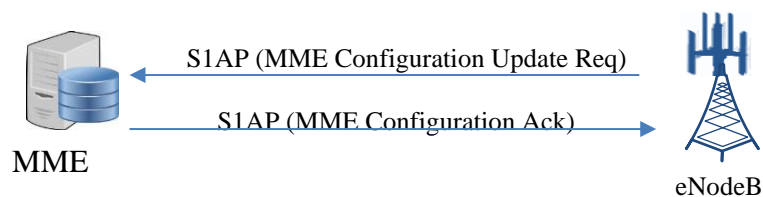


Fig. 68 a,b. Configurarea MME

#### 3.7.4.3. Procedura de accesare aleatorie bazată pe conținție

În acest mod, mai multe terminale pot încerca să acceseze rețeaua în același timp, rezultând astfel conflicte. Conflictul este rezolvat prin contestație de UE

#### 3.7.4.4. Conectarea RRC și procedura de atașare inițială

După procedura de accesare aleatorie urmează procedura de atașare. Terminalul trebuie să stabilească o conexiune RRC cu eNodeB cu scopul de a solicita resurse din rețea pentru servicii.

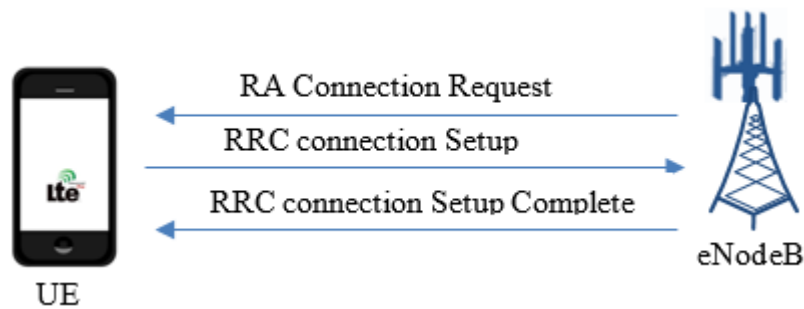


Fig. 73. Configurarea conexiunii RRC

#### 3.7.4.5. Atașarea NAS

Procedura de atașare NAS permite rețelei să recunoască terminalul și să-i autorizeze accesul la servicii.

Succesul procedurii de atașare va asigura terminalului:

- o adresa IP;
- purtătoare radio dedicată;
- context în MME dedicat acestui terminal.

#### 3.7.4.6. Proceduri NAS

Procedurile NAS presupun trafic de semnalizare și pot fi:

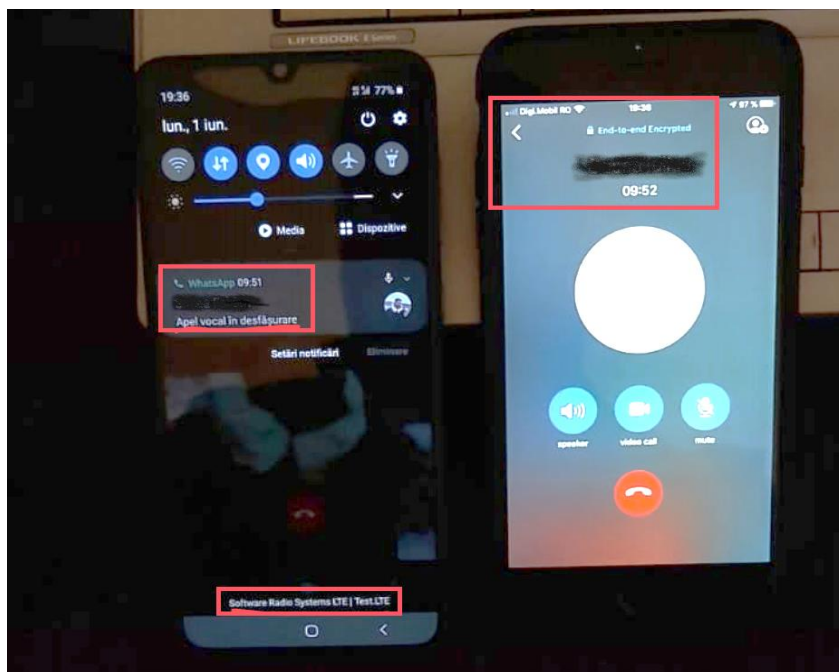
- Realocare GUTI (*Globally Unique Temporary Identifier*);
- Autentificare;
- Controlul securității;
- Identificare;
- Informații despre *Mobility Management*;

#### 3.7.4.7. Procedura de detașare inițiată de UE

Dacă terminalul nu solicită servicii din rețea, el se poate detașa prin transmiterea unui mesaj de cerere *Detach Request* (fig. 86a,b). Mesajul indică dacă detașarea se datorează unei "opriți" sau nu. Rețeaua și terminalul vor dezactiva contextul și purtătoarea EPS.

#### 3.7.4.8. Apel de date inițiat de mobil

După atașarea cu succes la rețea, UE poate efectua sesiuni de date. Am exemplificat aici un apel între rețeaua privată și rețeaua comercială Digi Mobil (fig. 87a,b), cu ajutorul aplicației Whatsapp. Datorită faptului că transmisia este criptată, nu este posibil să se afișeze capturi Wireshark cu pachete de date.



### 3.8. Sumarul capitolului

Acest capitol a descris implementarea unei rețele private de acces 4G cu transmisii radio definite *software*. Am creat o rețea LTE privată, sub Linux, compusă dintr-o serie de aplicații *opensource* sub umbrela *srsLTE* și un echipament SDR, Ettus Research B210. Scopul a fost realizarea unui mediu de laborator pentru testare, care să fie ușor de configurat, versatil și deschis către direcții viitoare de cercetare. Aplicațiile folosite au fost *srsENB* și *srsEPC* care au simulat un eNodeB și, respectiv, partea *core* a unei rețele LTE. Aceste aplicații au fost configurate cu parametrii specifici rețelelor LTE, toți aceștia fiind detaliați și explicați. De asemenea, au fost configurate cartele SIM noi, necesare desfășurării aplicațiilor de testare a rețelei la nivel de laborator. Pe aceste cartele au fost introduși toți parametrii de securitate activați pentru o procedură completă de autentificare și securizare în rețeaua privată. Atât apelurile realizate cât și procedura de pornire au fost analizate în modul *deep inspection*, cu ajutorul analizorului Wireshark. Rețeaua rezultată poate fi activată în mai puțin de un minut (*fast deployment*), poate funcționa în majoritatea benzilor de frecvențe ale rețelelor comerciale (suportate de toate telefoanele LTE disponibile pe piață) și care folosesc antene MIMO. Prezintă marele avantaj în posibilitatea de a-i fi schimbați rapid parametrii fie prin linia de comandă, fie prin modificarea unor fișiere de configurare în scopul testării diferitelor scenarii în care s-ar putea afla o rețea LTE. Arhitectura rețelei este de tip *top-down*, adică funcțional pleacă de la nivelele OSI superioare și coboară până în adâncimea stivei OSI, privită în ansamblu, ajungând la modificarea securității cartelelor SIM, pentru desfășurarea unor aplicații la nivel de laborator. Astfel se poate defini caracterul didactic, orientat spre cercetare al unei rețele de comunicații mobile, destinată studiului posibilităților de dezvoltare și optimizare a funcționării, plecând de la infrastructura de acces și ajungând la interconectarea nodurilor primare, reprezentată prin rețeaua *core*. Prin simularea acesteia, devine posibilă evidențierea caracteristicilor principale concretizate prin agregare, autentificare, control apel, încărcare, invocare serviciu și posibilități de accesare a altor rețele (gateway).

## 4. Optimizarea rețelelor de acces pentru servicii *all-IP*

Am considerat necesară analiza performanțelor rețelelor LTE în legătură cu programarea pachetelor pentru comunicațiile VoIP, deoarece tehnologia LTE a fost proiectată pentru comunicații de date, iar vocea este suportată sub forma VoIP.

În acest capitol am studiat performanțele serviciilor VoIP în rețelele LTE, în funcție de lărgimea de bandă, metoda de modulație și schemele de codare, folosind două tehnici de programare a pachetelor și cu vocoderele folosite preponderent în rețelele Vodafone din Europa.

### 4.1. Metoda hibridă (HARQ) de control a erorilor

HARQ funcționează pe principiul „*stop and wait*”, adică emițătorul transmite, apoi se oprește și așteaptă o confirmare (ACK) sau o infirmare (NACK), și apoi transmite următorul pachet sau îl retransmite pe același. Indiferent de confirmare sau infirmare, emițătorul trebuie să programeze și proceseze următoarea transmisie într-un interval de timp stabilit.

Modularea adaptivă și codarea (AMC – *Adaptive Modulation and Coding*) [117] încearcă să adapteze transmisiile de la un proces HARQ la condițiile canalului. În condiții de semnal puternic, sunt folosite o redundanță mai mică și/sau o modulație de ordin mai mare în transmisia inițială, permițând un debit mai mare de informație într-o bandă dată. În condiții de semnal slab, sunt folosiți mai mulți biți de redundanță și/sau o modulație de ordin mai mic pentru a crește probabilitatea recepției corecte. Acest aspect, însă, scade debitul informațional. Dacă rata de eroare tinde către 0, rezulta că se folosește prea multă protecție, iar dacă nu se folosește suficientă protecție, aceleași date vor fi retransmise, risipindu-se resurse. ENodeB decide ce tip de modulație va fi folosit în funcție de ce fel de informație este transmisă de către terminalul mobil în parametrul CQI, indicatorul de calitate a canalului (*Channel Quality Indicator*).

Experimentul a abordat programarea semi-persistentă (SPS – *Semi-Persistent Scheduling* [118]) pentru primele transmisiile (adică până când condițiile transmisiei se schimbă) și programarea dinamică pentru transmisiile ulterioare (în care se asighează resurse îndată ce datele devin disponibile, cu costul aglomerării preambulului cadrelor). Programarea SPS utilizează o planificare în care „adună” resurse și i le livrează complet abonatului, în loc să i le ofere periodic, în fiecare cadru. Controlul este realizat de eNodeB (pe baza CQI), care poate decide oricând reconfigurarea sau anularea SPS printr-un mesaj de semnalizare a resurselor radio, monitorizat permanent de abonat.

Rețeaua se bazează pe aplicația IXIA IxLoad și simulează un eNB, rețeaua *core*, și injectează trafic vocal IP pentru 100 de utilizatori. Transmisia radio pentru utilizatori este conformă cu recomandarea ITU-R M.1225 [121]. Câștigul antenei este estimat la 10dBi. Zgomotul la recepție se consideră la valoarea de 5dB. Frecvența purtătoare este 2.1GHz iar lărgimea de bandă 5MHz. Conform descrierii de mai sus, s-au considerat 8 procese HARQ, cu câte 4 retransmisii în caz de eroare, la fiecare 8ms. Canalul ideal nu prezintă erori deci nu este nevoie să se folosească nici HARQ nici AMC.



## 4.2. Rezultatele simulării

Pentru IMT-Advanced, se consideră ca au fost recepționate cu succes doar pachetele transmise între UE și eNodeB care au întârzieri mai mici de 50 ms. Dacă mai mult de 2% dintre pachete sunt întârziate sau pierdute, atunci abonatul este nesatisfăcut. Capacitatea sistemului este atinsă dacă mai mult de 2% dintre abonați sunt nesatisfăcuți [122].

În cazul inexistenței erorilor în canal, graficul din fig. 93 arată întârzierea pachetelor în rețeaua LTE de bandă 3 MHz, cu MCS=10, unde codetul G.729 are o performanță semnificativ mai bună decât cea a lui G.726.

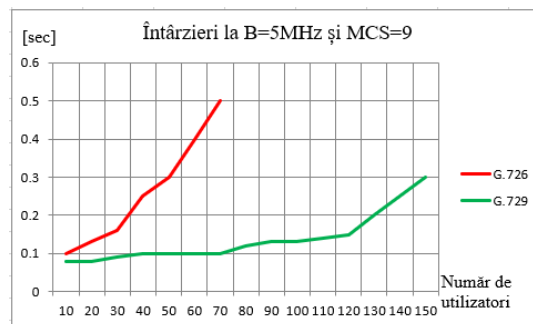


Fig. 93. Întârzierea pachetelor într-o rețea ideală

Folosind codetul G.729 capacitatea poate crește până la 120 de utilizatori pe celulă, în condițiile întârzierilor de până la 180ms și cu un procent de pachete pierdute de până la 0,5%. Operatorul poate impune o întârziere mai mică însă aceasta va afecta capacitatea maximă.

Valorile eficiențelor benzii și a celei spectrale au fost alese conform modelului canalului radio ales de operatorul Vodafone, acestea fiind influențate negativ de raportul dintre puterea emisă pe un canal radio și puterea recepționată de un canal adiacent după filtrare, și de semnalele de sincronizare și control. Din punct de vedere al parametrilor QoS, conform operatorului, s-a ales ca întârzierea pachetelor să fie mai mică de 90ms, iar pierderile la recepție mai mici de 1.8%.

Astfel pentru o rețea LTE cu B=3MHz și MCS=10, capacitatea rețelei pentru servicii VoIP este de 56, pentru B=3MHz și MCS=23 capacitatea rețelei crește la 84 de utilizatori, iar pentru B=10MHz și MCS=10, devine 102, SINR-ul variind între limite specifice fiecărui operator (fig. 96, 97).

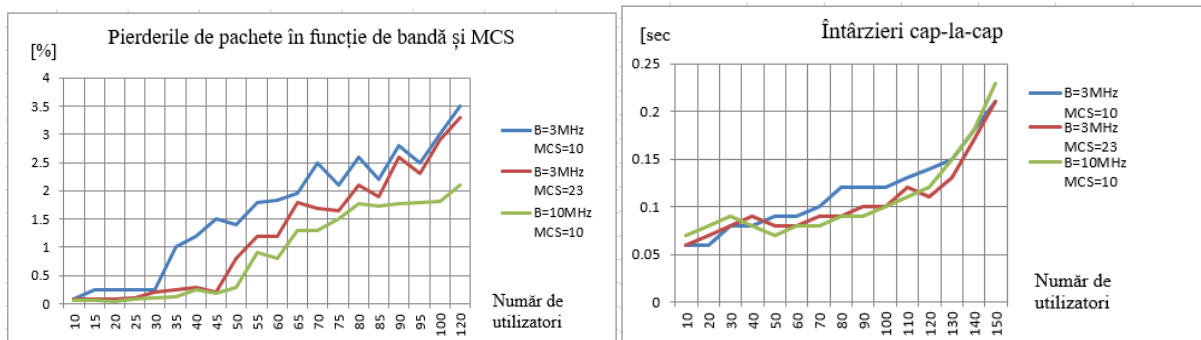


Fig.96. Pierderile pentru cele 3 cazuri

Fig. 97. Întârzierile pentru cele 3 cazuri

În figura 98 se remarcă o creștere a numărului utilizatorilor de servicii VoIP în cazul folosirii semi-persistenței, cu mențiunea că pentru o bandă de 3MHz apare aproximativ aceeași eficiență asupra performanței numărului de utilizatori, ca și în cazul folosirii programării dinamice pentru banda de 10MHz, MCS-ul fiind diferit. Mai rezultă că din punct de vedere al întârzierilor, SPS are o performanță mai bună. SPS poate deci fi folosită cu succes pentru aplicații de tip audio și video *live*, supraveghere, jocuri online ș.a.m.d..

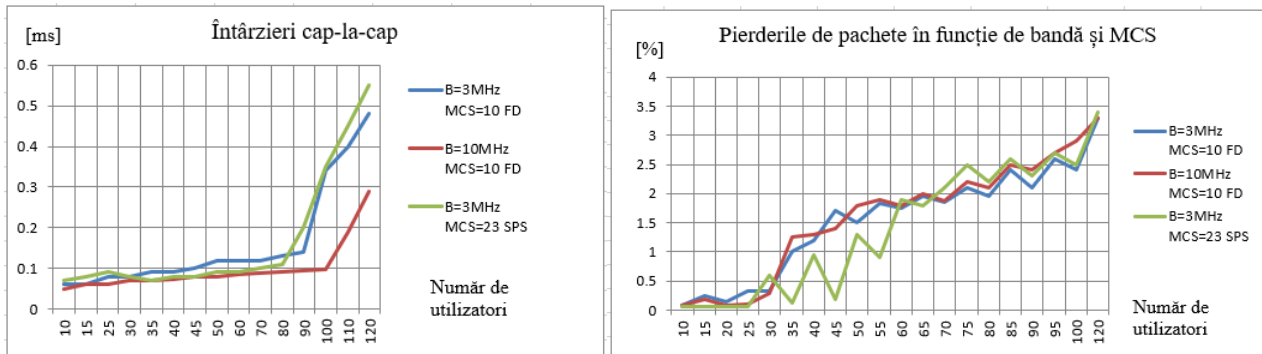


Fig.98.Întârzieri pentru cazurile SPS și FD. Fig. 99. Pierderile pentru SPS și FD

Studiul capacității serviciilor VoIP în condiții reale se bazează pe influența numărului de utilizatori asupra parametrilor principali QoS (pierderile de pachete și întârzierile acestora).

Față de condițiile ideale, în condiții reale pierderile de pachete sunt mari, iar întârzierile se pot ridica la valori inacceptabile pentru serviciile care necesită viteză și latență mică, din cauza condițiilor canalului radio care se pot modifica mereu.

Pentru un număr variabil de utilizatori, figura 100 arată comportamentul procentual al pierderilor totale pentru trei tipuri de simulări: fără HARQ și MCS, fără HARQ dar cu MCS și cu HARQ și MCS.

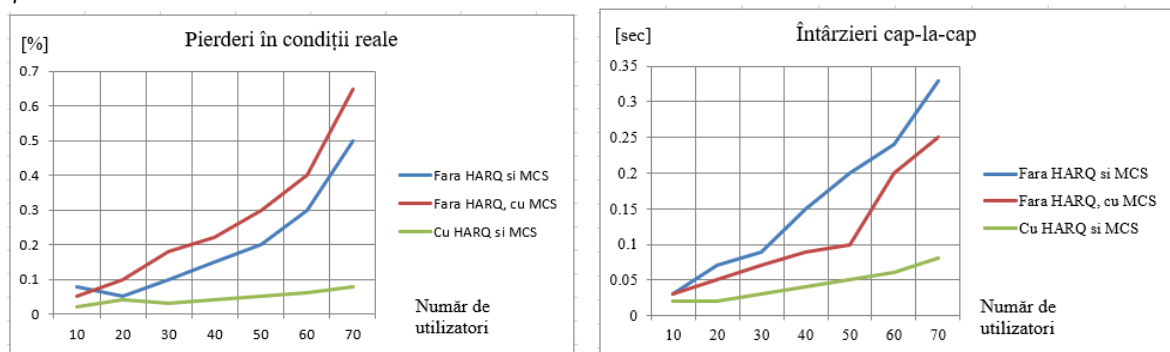


Fig.100.Pierderi cu sau fără HARQ și MCS. Fig. 101. Întârzieri în condiții reale

Față de cazul ideal, când am considerat lipsa erorilor, în cazul real se observă efectul introducerii corecției de erori în HARQ. Aceasta conduce la creșterea eficienței, datorită faptului că pachetele afectate de erori nu mai trebuie retransmise.

### 4.3. Sumarul capitolului

Acest capitol a fost dedicat eficientizării serviciilor VoIP în rețelele LTE ținând cont de lărgimea de bandă disponibilă, metoda de modulație și de schema de codare aleasă. Deoarece LTE folosește transmisia HARQ, un subcapitol a explicat acest aspect pentru ambele direcții de transmisie – *uplink* și *downlink* și a fost detaliat și procesul modulării adaptive și codării. Alți parametri precum câștigul antenei, zgomotul, diferitele atenuări ș.a.m.d., au fost estimate cât mai aproape de condițiile reale, fiind preluate din valorile folosite de operatorul Vodafone. Am simulat mai multe scenarii în care am schimbat lărgimea de bandă a canalului, schema de codare și tehnica de programare a pachetelor. Pentru cazul canalului ideal în care erorile nu există, nu s-au folosit corecții de erori, adaptări de canal și nici HARQ. Simularea a cuprins scenarii cu serviciile VoIP în condiții ideale și în condiții reale. Pentru ambele tipuri de condiții am studiat cazurile de întârzieri ale pachetelor și de pierderi pe *downlink* și *uplink*. Astfel am evidențiat performanțele rețelei prin folosirea a două modele - dinamic și semi-persistent, care oferă avantaje mai mari din punct de vedere al calității (dinamic), sau mai mici (semi-persistent).

De asemenea, deși folosirea tehnicii repetării automate în rețelele cu comutație de pachete, pentru serviciile în timp real, nu este considerată a fi satisfăcătoare [124], în principal din cauza costurilor adiționale, am demonstrat că introducerea HARQ a adus beneficii calitative, atunci când este cuplată și cu corecția de erori.

Ca o paranteză în studiul într-o perspectivă mai largă al rețelelor *all-IP*, în contextul faptului că atât Mobile WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) cât și LTE sunt cunoscute ca tehnologii de generația a 4-a, având multe puncte comune, cum ar fi arhitectura pură IP, ofertă de capacitate mare și mecanisme puternice QoS (*Quality of Service*), dar diferă în alte aspecte cheie, cum ar fi stratul fizic, am efectuat o analiză detaliată a acestuia (*Mobile WiMAX*).

Am demonstrat faptul că, prin metodologia propusă, sub aspectul debitelor de transfer, conform simulărilor în MATLAB, tehnologia LTE oferă o performanță mai bună decât *Mobile WiMAX*

- atât în *downlink* cât și în *uplink*;
- pentru modurile de operare TDD (*Time Division Duplex*) și FDD (*Frequency Division Duplex*);
- în cazurile folosirii schemelor de antene SISO (*Single-Input Single-Output*) și MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) 4x4;
- când am folosit o bandă de 20 MHz și modulație QPSK, 16QAM și 64QAM, conform majorității utilizatorilor de pe glob;

[validare și diseminare în cadrul articolului 7.3.5.13]

## 5. Implementarea serviciilor multimedia in rețelele LTE

Obiectivul principal al LTE este comunicarea de date, de aceea există doar suport pentru domeniul "*Packet Switched*" (PS). Nevoia pentru tehnologia PS a izvorât din dorința de a reduce risipa resurselor operatorului mobil. Într-o rețea PS, toți utilizatorii vor avea parte de aceleași servicii astfel încât rata lor de transfer, latența și pierderile de pachete vor fi variabile în funcție de cât de mare este traficul rețelei. Cu toate acestea, deoarece vocea este serviciul de bază pentru marea majoritate a clienților, se pune întrebarea despre modul în care vocea poate fi disponibilă prin cele mai avantajoase soluții tehnice. O soluție testată pe o platformă de simulare, în care am folosit un subsistem IMS și un simulator LTE (4Gsim), care presupune utilizarea platformei OMNeT++, poate deveni o alternativă nouă pentru operatorii de rețele mobile.

### 5.1. Soluții existente

#### 5.1.1. Revenirea la rețeaua cu comutație de circuite (CSFB – *CS fallback*)

Dintre soluțiile existente, procedura de revenire la rețelele 2G și 3G, în zona de acoperire LTE, se aplică de fiecare dată când terminalul LTE primește sau inițiază un apel [127]. Practic se transferă apelul în rețeaua cu comutație de circuite.

#### 5.1.2. VoLGA – Voce prin LTE prin Acces Generic

O altă soluție se bazează pe introducerea unei interfețe (*gateway*), între rețelele bazate pe standardul 3GPP și rețelele 2G sau 3G. La fel ca în cazul soluției precedente, nici aici nu se fac modificări asupra rețelelor LTE, 3G și 2G existente, pentru că se interfațează un nou echipament între rețelele de acces, denumit VANC (*VoLGA Access Network Controller*) [129] care joacă rolul unui nod superior de rețea (RNC - corespunzător rețelei 3G, sau BSC - corespunzător rețelei 2G).

#### 5.1.3. Neîntreruperea apelului vocal păstrând purtătoarea - *Single Radio Voice Call Continuity*

SRVCC oferă voce (prin IMS) în aria de acoperire LTE, iar în afara ei, voce prin CS. Punctul comun și de control al *handover*-ului este IMS, care trebuie să fie interfațat cu ambele tehnologii între care are loc transferul.

#### 5.1.4. Servicii și aplicații VoIP

Aici cele mai bune și mai cunoscute exemple sunt aplicații ca Whatsapp, Nextiva, Talkatone, WeTalk și altele. Un bun avantaj al alegerii acestei soluții de voce prin LTE este că sunt gratuite și nu necesită schimbări la nivelul rețelei.

Adoptarea uneia din aceste soluții pentru serviciile de voce, este la latitudinea fiecărui operator, atât în funcție de gradul de dezvoltare al rețelei (sau rețelelor, incluzând și rețelele vechi) cât și de avantajele și dezavantajele descrise mai sus [132].

Operator	CSFB	VoLGA	SRVCC	VoIP
are rețele vechi nu va instala IMS	✓ ieftin	✓ scump	✗	✓
are rețele vechi va instala IMS	✓	✓	✓	✓
nu are rețele vechi va instala IMS	✗	✗	✓	✓
nu are rețele vechi nu va instala IMS	✗	✗	✗	✓

Tabelul 5.1.4. Rezumatul analizei precedente

## 5.2. Demonstrator IMS LTE

Scopul acestui experiment este de a studia soluțiile bazate pe IMS pentru rețelele LTE. Rețeaua construită în experimentul de față cuprinde 3 componente principale - rețeaua de abonați, rețeaua LTE implementată în OMNeT și comunicarea, care folosește mesaje reale, cu mediul exterior care include și platforma OpenIMS.

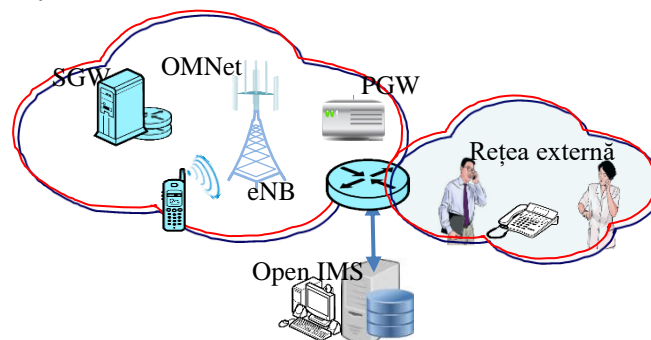


Fig. 105. Componentele demonstratorului pentru VoLTE cu ajutorul IMS

Aplicația Open IMS Core este o implementare *opensource* a funcțiilor de control care realizează sesiunile de apeluri IM, și a unui server HLR, mai exact HSS pentru 4G. Aceste funcții formează împreună elementele centrale ale tuturor arhitecturilor IMS / NGN [133]. Este un proiect al Institutului Fraunhofer FOKUS care își propune să umple vidul IMS actualmente prezent în peisajul de *software opensource* cu o soluție flexibilă și scalabilă.

Pentru a adapta mesajele care sunt transferate de la o componentă de rețea la alta, au fost necesare două elemente de mediere [134], un router NAT (*Network Address Translate*) și un router RIP.

Routerul NAT, așa după cum se poate observa în fig. 105, a fost utilizat pentru a direcționa mesajele de la clienții reali de telefoane soft SIP (rețeaua de abonați) la subrețeaua OMNeT care este dedicată utilizatorilor simulați (UE). Acest submodul NAT funcționează pe baza unui set de adrese mapate în prealabil.

Pentru simularea abonaților care utilizează servicii vocale, există mai multe opțiuni de clienți SIP: X-Lite, OpeniCLite, UCT IMS Client. Am ales UCT IMS Client, o aplicație special concepută pentru OpenIMS, care are o serie de parametri preconfigurați.

Mesajele SIP sunt încapsulate în traficul GTP și sunt astfel transportate de rețeaua LTE.

### 5.3. Demonstrator SIP

A fost implementat un set de "modele complexe", bazate pe modelul INET existent, inclusiv protocoale și interfețe pentru principalele elemente de rețea ale arhitecturii LTE: acestea sunt UE-s, eNodeB, MME, HSS, S-GW și P-GW.

Modelele simple care au fost implementate sunt încorporate în modelele complexe care cuprind interfețele de protocol [137]: nivelurile interfețelor radio, cum ar fi modulul NAS și modulul LTERadio (folosit pentru comunicația UE-eNodeB), interfața S1AP, pentru interconectarea eNB cu MME, modulul DiameterS6a, utilizat pentru comunicarea cu HSS. Desigur, modulele importante sunt cele care descriu interfețele GTP-C și GTP-U, deoarece traficul SIP de la utilizatori la IMS interconectat a fost transportat la nivelul utilizatorului LTE prin încapsularea cu GTP-U.

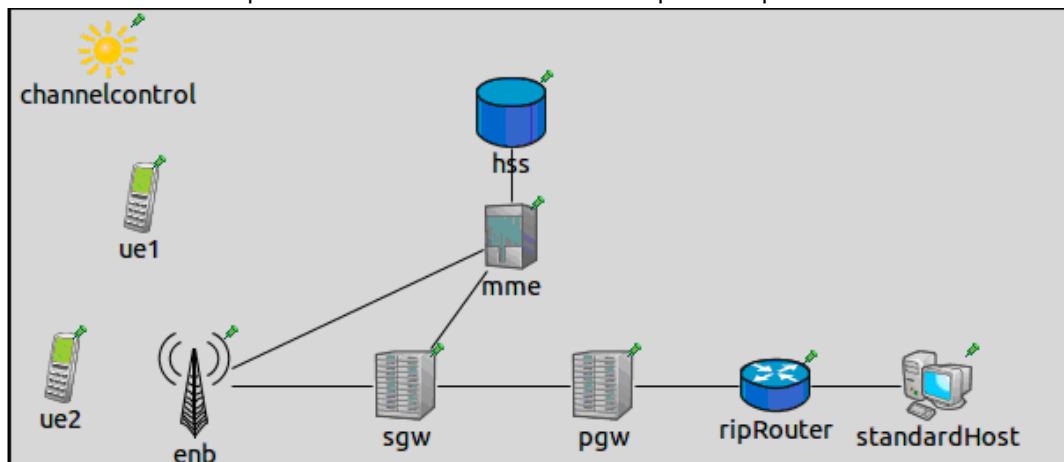


Fig. 106. Arhitectura unei rețele LTE simple implementată în 4Gsim OMNeT++

Se poate considera drept exemplu de modul complex modelul din fig. 107 care arată modelul P-GW care a fost implementat în OMNeT, inclusiv interfețele GTP-C și GTP-U, modulul Routing RIP și aplicația CLI. Cele mai multe elemente fizice reale au un set de comenzi specific furnizorilor, astfel încât acest modul CLI care a fost scris permite accesarea oricărui element de rețea LTE din rețeaua emulată printr-o interfață tip telnet. Au fost implementate comenzi specifice CLI, în principal pentru monitorizarea sau interogarea unora dintre elementele rețelei. De exemplu, căile de afișare a tuturor comenzilor sunt folosite pentru interogarea tunelurilor GTP definite la acel moment la nivelul P-GW. De asemenea, pentru scopul monitorizării, tcpdump poate fi pornit pe orice interfață simulată pentru captarea de pachete.

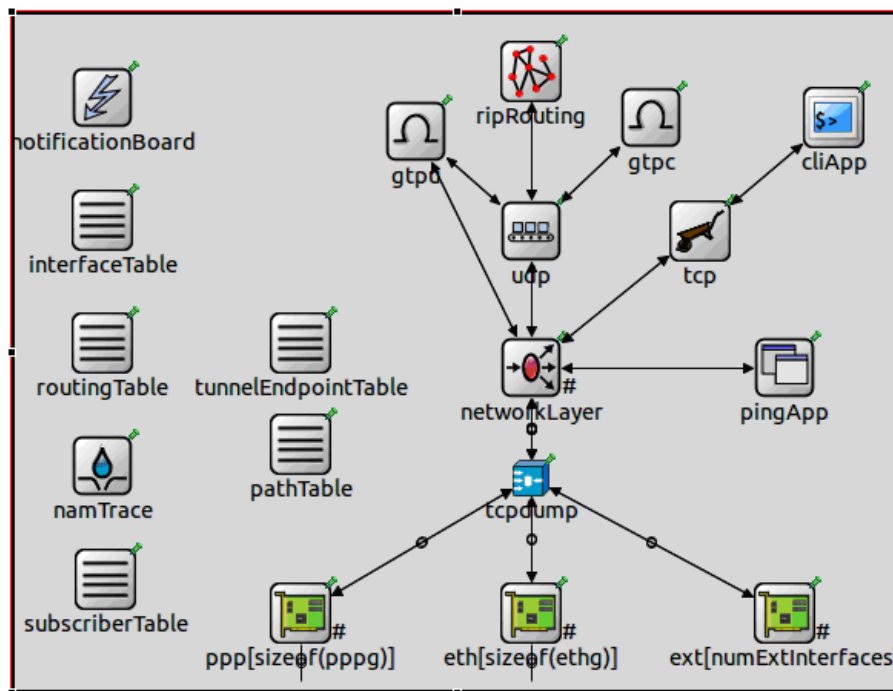


Fig. 107. Modulul PGW implementat in 4Gsim

Scenariile testate includ atașarea echipamentului mobil la rețeaua LTE, inclusiv alocarea adresei IP și înregistrarea la serverul SIP OpenIMS, testarea ICMP bazată pe modulul PingApp existent în OMNeT. Scopul demonstratorului a fost scenariul de comunicație complet VoIP, prin rețeaua LTE și rețeaua IMS.

Deoarece s-a avut în vedere scopul educațional al experimentului, toate fluxurile de mesaje au fost monitorizate la nivelul rețelei LTE și la nivelul protocolului SIP, iar configurația elementelor de rețea a fost verificată prin aplicația CLI implementată. La nivelul OpenIMS, au fost de asemenea monitorizate înregistrarea utilizatorilor SIP și mesajele interne între funcțiile de control al apelurilor / sesiunilor (P-CSCF, I-CSCF și S-CSCF).

În același context, al serviciilor de timp real, am prezentat standardul WebRTC (*Web Real Time Communications*), arhitectură, mediul de dezvoltare, avantajele acestuia și piețele spre care acesta este ținut. Un alt punct comun cu cercetarea în domeniu a constituit-o noțiunea de *peer-to-peer*, discutată pe larg în capitolul următor. Am implementat o aplicație de comunicație în timp real folosind Unify Circuit, Node.js, Express Framework și OpenSSL. Am demonstrat că aplicația a funcționat la un nivel de calitate înalt, atât timp cât viteza internetului este suficientă.

De asemenea, dat fiind faptul ca soluția de *web-conferencing* prezentată produce o încărcare destul de mare, am introdus și posibilitatea anulării fluxului video și chiar și a celui de voce, în scopul de a nu risca probleme de calitate sau deconectare.

Am demonstrat faptul ca WebRTC poate fi integrată și ajustată pentru oricare cerință a utilizatorilor. În prezent, câteva dintre cele mai mari companii din lume – Google, Amazon, Oracle, Facebook, Twilio, Citrix – au implementat această tehnologie, doar la un an de la apariția ei pe piață.

[validare și diseminare in cadrul articolului 7.3.4.13]

## 5.4. Traficul video in configurațiile LTE multi-antenă

Tehnologia LTE a fost proiectată pentru a servi un trafic de date din ce în ce mai mare și, mai ales, să reziste unor rafale ocazionale de trafic cauzate de diferite evenimente care se doresc a fi urmărite în timp real. LTE va trebui să își gestioneze judicios resursele datorită faptului că traficul video nu este unul constant și, în același timp, va trebui să caute să ofere o experiență de o calitate cât mai bună.

Deoarece această secțiune este axată pe traficul video pe *downlink*, am analizat o rețea LTE a unui operator comercial din România, care folosește banda de 1800MHz, cu lățimea de bandă de 20 MHz, aceasta fiind cea mai întâlnită bandă a operatorilor din Europa [145], în comparație cu alte rețele. Modul utilizat în acest caz este FDD [146]. Pentru această configurație există 100 de blocuri de resurse (RB) disponibile, fiecare cu 168 simboluri pe ms. La o modulație 64QAM (6b/simbol), debitul va fi de 100.8 Mbps pentru o singură antenă. Pentru MIMO 2x2 acesta se dublează iar pentru MIMO 4x4 el devine de aprox. 300Mbps, deoarece un sfert din debit este consumat de semnalizare.

## 5.5. Caracteristicile transmisiei video prin radio

Pentru evitarea unui consum mare de bandă, datele fluxului video sunt comprimate la transmisie, iar la recepție sunt decomprimate. Compresia și decompresia au durate diferite, astfel că la stocarea imaginilor compresia nu este critică, dar decompresia este critică. Pentru serviciile TVoverIP compresia și decompresia sunt critice având cerințe de timp real la transmisie și la redare.

Terminalele mobile folosite în rețelele 4G diferă prin caracteristicile lor *hardware* și *software* (procesoare, capacitate de stocare a memoriei interne, dimensiune ecran, sisteme de operare). Astfel pentru un ecran mai mare, este nevoie de mai multe nivele de cuantizare folosite la tipul de codare, ceea ce conduce la obținerea unor cadre video de dimensiuni mai mari.

Luând în considerare aceste condiții, transmisia unor debite ridicate pe o perioadă mai lungă depinde și de localizarea utilizatorului în celula acoperită de semnal, precum și de modalitatea de scurgere a traficului dintr-o rețea aglomerată cu utilizatori. Gradul de fluidizare al traficului și debitul de date permis de terminalele mobile, trebuie luate în considerare pentru a obține o calitate corespunzătoare a fluxurilor video livrate.

## 5.6. Parametrii folosiți

Soluția propusă a fost realizată cu ajutorul echipamentului *Optixia XM2 – IP Performance Tester*. Configurația testelor și parametrii folosiți se găsesc în tabelul 5.6.1, respectiv 5.6.2.

Pentru simplificarea simulării se vor considera abonații aflați în afara zonei de interferență, adică abonați situați în zona aflată cel mai aproape de mijlocul celulei.

În acest sens se va considera zona descrisă de jumătate din raza celulei, această rază fiind aproximativ jumătate din distanța dintre eNodeB-uri (tabelul 5.6.1). Am considerat 2 abonați plasați aleator în fiecare celulă, deci 46 de abonați în cele 23 de celule simulate. HARQ a fost descris în cap. 4.1.



Test	Frecvența [GHz]	Lărgimea de bandă [GHz]	Atenuare [dB]	Distanța între eNB [km]	Viteza de deplasare a abonatului [km/h]
Test 1	1.8	20	20	2	5
Test 2	1.8	20	24	0.8	10
Test 3	1.8	20	10	0.8	50

Tabel 5.6.1. Configurația experimentelor

Configurația simulării	Descriere
Configurația rețelei	23 de celule fiecare cu 3 sectoare
Configurația antenei	MIMO 2x2 si 4x2
Puterea de emisie	40dBm
Puterea emisă a terminalului simulat	30dBm (1W), 24dBm (250mW)
Distanța minimă dintre terminal si antenă	100m
Modulare adaptivă si codare	Activat
HARQ	Activat, 4 retransmisii

Tabel 5.6.2. Parametrii folosiți

Simularea presupune faptul că fiecare abonat se conectează la o sursă de trafic video care poate fi aceeași pentru mai mulți utilizatori, deoarece numărul surselor video și cel al utilizatorilor nu coincid. Simularea nu se încheie atunci când un utilizator ajunge la capătul capturii, ci captura se reia de la început și are o durată de 180 de secunde.

## 5.7. Rezultatele experimentale

În funcție de numărul de antene ales (2x2 MIMO, 4x2 MIMO), vor fi prezentate o serie de experimente în care se evidențiază diferențele asupra eficienței spectrale a sistemului și a calității transmisiei video.

În aceste experimente am considerat cunoscută capacitatea canalului de transmisie, atenuarea considerată a fi de tipul *flat-fading* (în care toate componentele în frecvență ale semnalului suferă aceeași intensitate a fenomenului de *fading*) iar CSI se consideră complet cunoscută la recepție. CSI cuprinde totalitatea informațiilor referitoare la un canal radio de comunicație (împrăștiere, atenuare ș.a.m.d.) și este folosită la adaptarea dinamică a transmisiunii în funcție de condițiile la care este supus respectivul canal.

Experimentul bazat pe modelul "*full buffer*", pleacă de la premisa că *buffer*-ele fluxurilor de date ale utilizatorilor au capacități finite, dar datele se transmit continuu, iar numărul utilizatorilor dintr-o celulă este constant. Acest model este folosit pentru evaluarea performanțelor rețelelor wireless.

Tabelul 5.7.1 înfățișează câștigurile în eficiența spectrală raportate de tehnica MIMO 4x2 față de cea 2x2. Se poate deduce că mărirea numărului de antene de transmisie conduce cu siguranță la creșterea eficienței spectrale resimțită cu atât mai mult de abonații cu SINR mai mic.

Test	Configuratia antenelor	Centrul celulei		Marginea celulei	
		Eficienta spectrala [b/s/Hz]	Castigul fata de 2x2MIMO	Eficienta spectrala [b/s/Hz]	Castigul fata de 2x2MIMO
Test 1	2x2MIMO	1,82	-	0,05	-
	4x2MIMO	2,2	16%	0,09	75%
Test 2	2x2MIMO	1,35	-	0,04	-
	4x2MIMO	1,8	28%	0,066	90%
Test 3	2x2MIMO	1,8	-	0,045	-
	4x2MIMO	2,1	18%	0,078	75%

Tabelul 5.7.1. - Câștigul în eficiența spectrală a tehnicii MIMO 4x2 față de cea 2x2 pentru modelul *full buffer*

Tabelul 5.7.2. ilustrează performanțele MIMO în condițiile în care toți utilizatorii beneficiază de același trafic indiferent de condițiile canalului. Aici s-au folosit capturi video de 256kbps iar rețelele au fost FDD/LTE cu lărgime de bandă de 20MHz (ca și la Vodafone, Orange și Telekom România).

Test	Configuratia antenelor	Eficienta spectrala [b/s/Hz]	Castigul fata de 2x2MIMO	Numarul utilizatorilor
Test 1	2x2MIMO	1,1	-	40
	4x2MIMO	1,5	40%	53
Test 2	2x2MIMO	0,8	-	26
	4x2MIMO	1,23	58%	43
Test 3	2x2MIMO	1,03	-	25
	4x2MIMO	1,45	45%	42

Tabelul 5.7.2. – Câștigul 4x2 SU-MIMO față de omologul 2x2, pentru modelul *streaming* video

Din Tabelul 5.7.2 rezultă faptul că performanțele 2x2 MIMO sunt cu mult depășite de către tehnica 4x2 MIMO în toate cele 3 scenarii avute în vedere. Privind și la Tabelul 5.7.1 se poate observa faptul că modelul *full buffer* are performanțe superioare la marginea celulei, atunci când se mărește numărul antenelor la transmițător. De asemenea în ultimul caz, în care s-a ales o viteză de deplasare mai mare a utilizatorilor (50km/h față de viteza de mers 5km/h), performanțele au crescut semnificativ.

## 5.8. Sumarul capitolului

Acest capitol a fost dedicat serviciilor multimedia, unde, prin configurarea antenelor multiple, se eficientizează traficul video și suportul vocal prin LTE, având în vedere faptul că tehnologia LTE a fost proiectată să ofere doar comunicații de date.

Sumarizând, apelul vocal pentru un operator

- cu rețele 2G și 3G deja active, le poate folosi pe acestea prin CSFB (soluție mai ieftină) sau VoLGA (soluție mai scumpă);
- doar cu rețea LTE fără IMS, poate folosi aplicații precum Whatsapp;
- având rețea LTE cu IMS, poate folosi SRVCC.

Demonstrația experimentală a cuprins abonații (simulați cu aplicația UCT IMS Client), rețeaua LTE implementată în OMNet și comunicarea cu exteriorul cu ajutorul mesajelor reale, acest lucru fiind realizat cu platforma OpenIMS. HLR și funcțiile de control ale rețelei *core* au fost simulate cu aplicația OpenIMS Core. A fost implementat un modul complex în OMNet prin care oricare element din rețeaua LTE poate fi accesat cu ajutorul unor comenzi CLI. Scenariile testate includ atașarea echipamentului mobil la rețeaua LTE, inclusiv alocarea adresei IP și înregistrarea la serverul SIP OpenIMS, testarea ICMP bazată pe modulul PingApp existent în OMNeT. Scopul demonstratorului a fost scenariul de comunicație complet VoIP, prin rețeaua LTE și rețeaua IMS.

În ceea ce privește traficul video, am demonstrat faptul că trecerea de la tehnica 2x2 MIMO la 4x2 MIMO are beneficii din punct de vedere al vitezei de transmisie, a creșterii debitului informațional și a reducerii interferențelor de la marginea celulei, atunci când traficul de date este cel video. De asemenea s-a studiat cazul mobilității, fiind ales și un caz în care abonatul nu se mișcă la viteza de deplasare pedestră, ci se află într-un mijloc de transport. Valorile obținute indică faptul că îmbunătățirile aduse de tehnica 4x2 pot mări capacitatea rețelei LTE cu de la 30 până la 50% față de performanțele tehnicii 2x2 în funcție de viteza de deplasare a utilizatorilor.

Am ales abordarea problemei capacității mai mult decât cea a debitului informațional. Cele 2 noțiuni sunt corelate în sensul că atât timp cât un abonat are parte de o transmisie mai rapidă și mai stabilă, astfel încât nevoia de retransmisie scade drastic, atunci rămâne mai multă capacitate liberă pentru ceilalți utilizatori. Ca urmare, experimentele pot continua cu tehnica 4x4 MIMO, însă în acest caz un dezavantaj semnificativ ar fi creșterea costurilor.

## 6. Soluții P2P pentru îmbunătățirea serviciilor în rețelele radio

Un subiect inevitabil care trebuie discutat în fazele incipiente ale instalării unei noi rețele este costul adițional adus. Odată cu lansarea unei noi tehnologii, fie ea 4G sau 5G, vor trebui instalate noi echipamente și va apărea un nou strat logic care va trebui configurat prin cele deja existente, de obicei acestea fiind 2G și 3G [152].

În consecință va crește numărul interfețelor și încărcarea pe rețeaua de semnalizare. Astfel, este recomandat că atât mentenanța cât și operarea rețelei 4G să fie automatizată pe cât posibil de mult, cu alte cuvinte trebuie introdusă automatizarea.

A fost deci introdus conceptul de SON (*Self Organizing Networks*) [153], acesta având ca prim scop reducerea costurilor operatorilor, dar care se axează și pe o serie de alte criterii. Unul dintre acestea este reducerea numărului de parametri configurabili (care în rețelele 2G și 3G poate ajunge la un număr covârșitor) ai fiecărui eNodeB precum și automatizarea implementării acestora. Un alt criteriu este automatizarea introducerii relațiilor de vecinătate dintre toate elementele rețelei LTE, precum și posibilitatea alocării lor în mod dinamic în funcție de necesitățile rețelei, acest aspect contribuind de asemenea și la micșorarea pericolului de congestie al rețelei ș.a.m.d.

### 6.1. Arhitecturile P2P și LTE

Din punctul de vedere al auto-gestionării, tehnologia *Peer to Peer* (P2P) are această caracteristică drept punct de pornire în arhitectura ei. Prin definiție [154], tehnologia P2P este o arhitectură care distribuie diferitele aplicații sau încărcări ale rețelei între membrii acesteia. Toți membrii rețelei au privilegii egale.

Fiecare membru își face disponibilă o porțiune din resursele lui, spre exemplu putere de procesare, spațiu de depozitare a datelor sau lățime de bandă, pentru alți membri ai rețelei. Acest lucru se efectuează fără a fi nevoie de coordonare de la un server sau de la o mașină cu privilegii superioare.

Membrii sunt atât furnizori de resurse cât și consumatori, spre deosebire de modelul client-server în care oferta și consumul de resurse sunt împărțite diferit.

Inițial, tehnologia P2P a fost folosită în principal pentru aplicații legate de internet.

Din cauza că, principal, rețeaua LTE este concepută ca fiecare nod (eNodeB) să aibă privilegii și capacități egale, o comparație între tehnologia P2P și cea LTE pare firească. În această secțiune se vor analiza cerințele auto-organizării și aplicabilitatea lor din punct de vedere al principiilor P2P.

### 6.2. Rețele cu organizare automată

Organizația *Next Generation Mobile Network* (NGMN), a separat SON în trei piloni, auto-configurarea, auto-optimizarea și auto-repararea [155]. Există și implementarea ANR (*Automatic Neighbor Relation*) și, într-o mare măsură, auto-optimizarea proceselor de operare și mentenanță, conform unor șabloane trasate în prealabil [156].

Pentru a servi multitudinea de arhitecturi existente în rețelele LTE, au fost concepute trei tipuri de arhitecturi SON: distribuită, centralizată și hibridă, ultima fiind cea mai performantă deoarece combină punctele forte ale amândurora însă fiind și cea mai dificil de implementat.

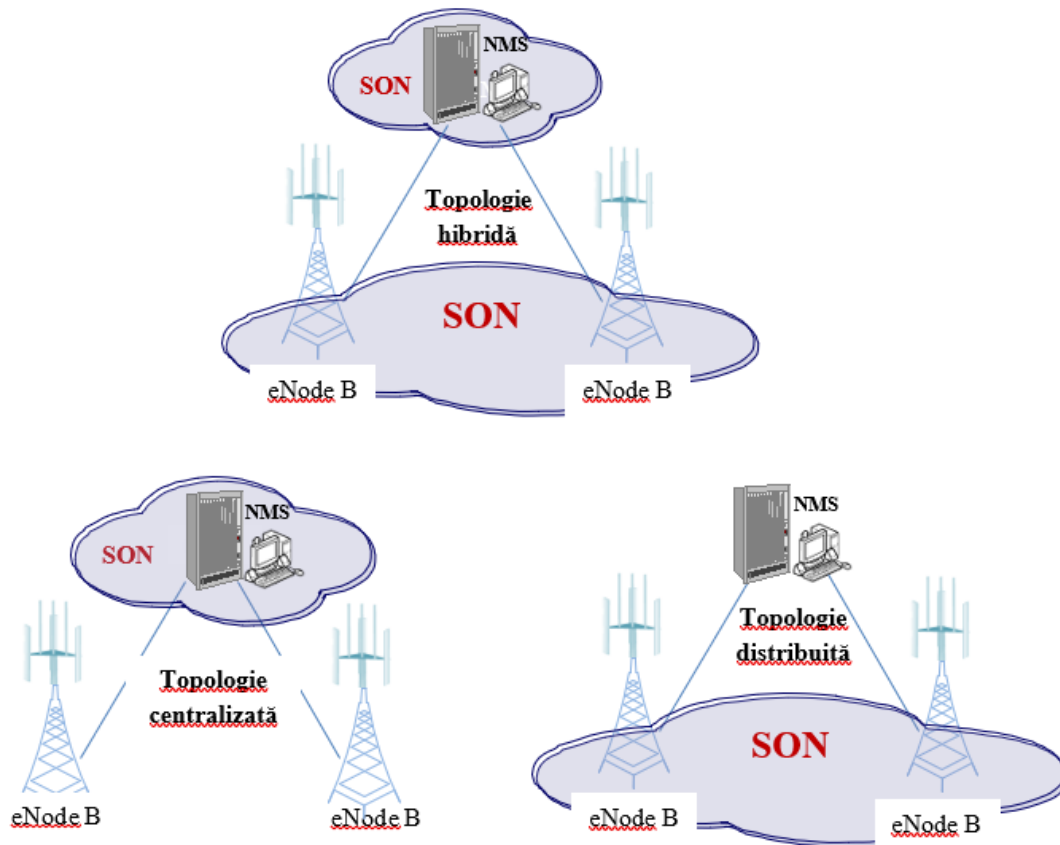


Fig. 111. Tipuri de arhitecturi SON [158]

Modelul SON distribuit este cel mai apropiat de principiile după care a fost concepută rețeaua LTE, în care s-a dorit ca fiecare eNodeB să aibă aceleași privilegii și capacități ca oricare alt eNodeB din aceeași rețea. Astfel, fiecare eNodeB are un modul SON. Acest modul este avantajos pentru rețelele LTE mici, cu puține eNodeB-uri, acesta dispunând de o viteză de automatizare mare. Dezavantajul îl reprezintă încărcarea sporită asupra rețelei de semnalizare deoarece având atât de multe module SON, este nevoie de o sincronizare optimă.

În cazul în care este vorba de o rețea extinsă este recomandată folosirea modului SON centralizat. Aici modulul SON se află doar la nivelul sectorului central al rețelei LTE, dar viteza de automatizare este redusă. Acest modul este însă mai ieftin de implementat decât cel distribuit.

### 6.3. Tipuri de topologii in rețelele P2P

- Topologia centralizată

Există câteva mașini care cuprind toată informația din rețea. Dacă un nod dorește informații despre oricare alt nod, el va trebui să interogheze serverul.

- Topologia DHT (*Distributed Hash Table*)  
Această topologie deține o bază de date care conține diferite informații specifice rețelei și la care nu se poate ajunge fără a avea o cheie. Fiecare cheie permite accesul la o anumită informație. Fiecare nod păstrează un anumit număr de perechi cheie-informație.
- Topologia distribuită nestructurată  
Inițial acest algoritm interoga pe toți apartenenții la rețea însă, din cauza pericolului de congestie, anumite noduri au fost upgrdate și au devenit *ultrapeers*, astfel ca toate nodurile nu mai sunt egale din punct de vedere al privilegiilor.
- Topologia cvasi-distribuită  
Aici, cel mai cunoscut algoritm este Skype. Această topologie poate fi privită ca un melanj al topologiilor distribuită structurată și centralizată deoarece ele sunt ambele folosite concomitent însă în părți diferite ale rețelei. Algoritmul Skype folosește noțiunile de *supernode* (care poate fi privit ca un server *proxy*) și *ordinary node*.

### 6.3.1. Proprietățile și avantajele P2P

- Echilibrarea încărcării
- Fiabilitate
- Descentralizare
- Eficientizare

### 6.3.2. Topologiile P2P în arhitectura LTE

În continuare voi face o paralelă între rețelele SON care utilizează principii similare de funcționare cu cele ale rețelelor P2P, cu scopul de a creiona o posibilă adaptare a rețelei LTE conceptelor P2P.

- Topologia aleasă  
Prin alegerea unei topologii corespunzătoare, unde monitorizarea unui nod este efectuată de către un nod adiacent, P2P poate reduce riscul congestiei.
- Metodele de echilibrare a încărcării rețelei  
Echilibrarea acestei încărcări se poate face și prin algoritmi P2P (exemplu – algoritmul Chord).

- Localizarea resurselor disponibile

În scopul de a nu încărca în mod exagerat rețeaua de semnalizare, resursele necesare rețelei mobile LTE nu trebuie să aparțină doar de un număr mic de echipamente, ci, în mod ideal, de toate echipamentele rețelei.

- Arhitectura rețelei

Topologia Napster [164] este cea mai apropiată din punct de vedere al conceptului de arhitectură SON centralizată deoarece toată partea decizională și de optimizare este deținută și gestionată de nucleul rețelei. Particularitatea rețelei SON centralizată constă în faptul că nodurile care se vor plasa în mijlocul rețelei cunosc adresele resurselor care mai apoi vor fi căutate de eNodeB-uri aflate în oricare loc al rețelei.

Topologia semi-distribuită P2P corespunde cel mai bine rețelei SON combinate (figura 113). Aici există o ierarhie în sensul că supernodurile care trebuie plasate cât mai egal, din punct de vedere logic, în rețea, conțin informații (rutare, *location updating*) și pot efectua operațiuni mai avansate (*multi-core*, redundanță) decât restul echipamentelor rețelei care creează legături cu ele în mod dinamic. Datorită faptului că vorbim despre o rețea hibridă, aici se pot folosi și metode P2P de complexitate redusă pentru căutarea informațiilor despre resursele rețelei.

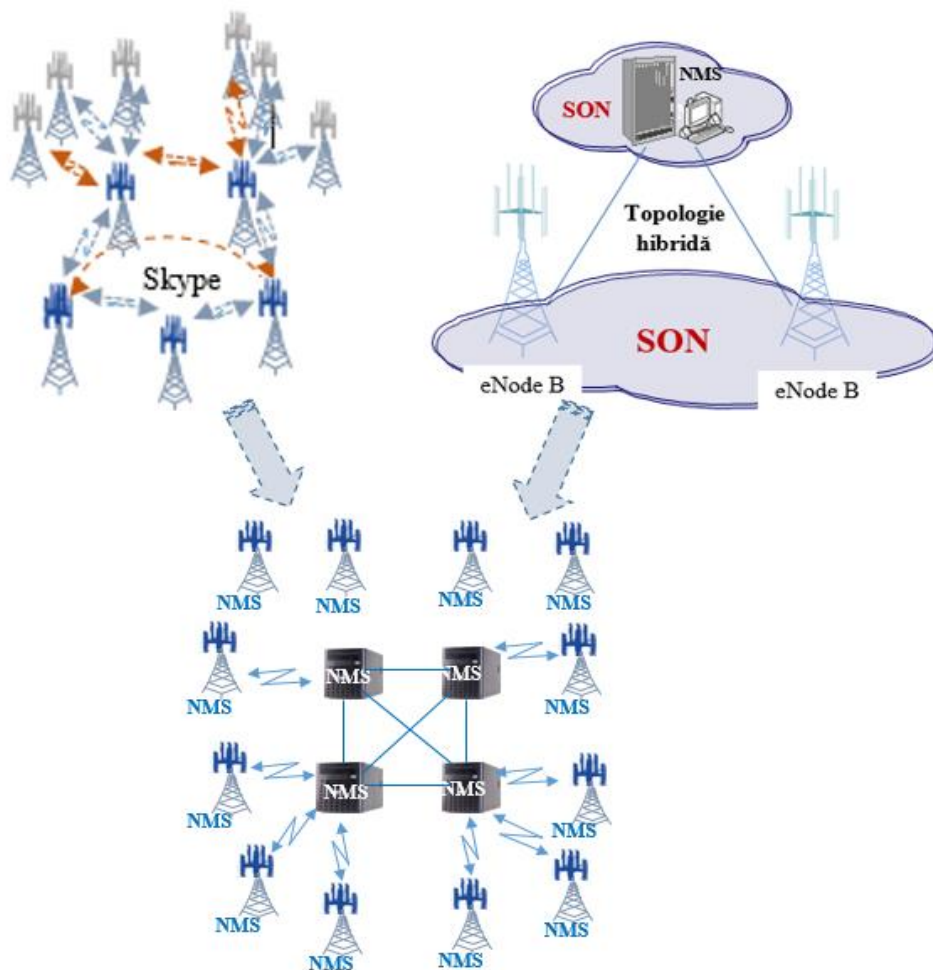
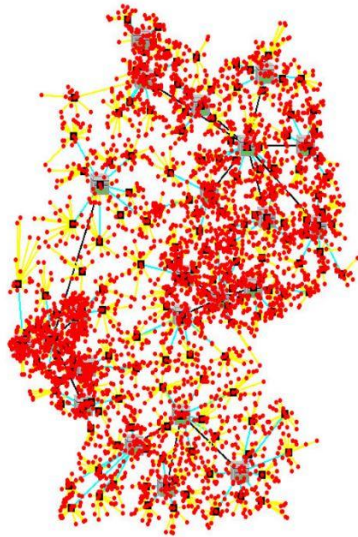


Fig. 113. Rețea LTE adaptată la topologia P2P hibridă

## 6.4. Studiu de caz pentru adaptarea P2P la o rețea LTE

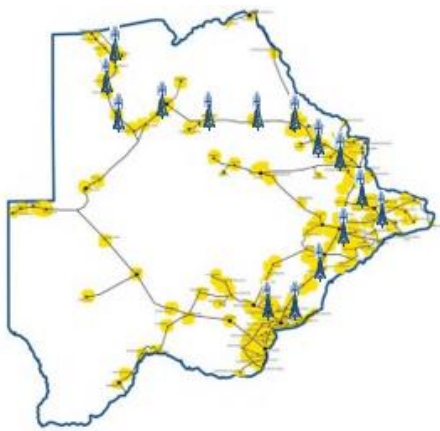
Rețelele LTE pe care le-am luat în considerare pentru implementarea tehnologiei P2P pentru a genera îmbunătățiri semnificative sunt rețelele cu topologie în formă de stea. Pentru un studiu de caz scurt, au fost alese rețelele mobile ale unui operator din Germania și unul din Botswana, deoarece LTE este implementat aici în așa-numitele "insule".



Rețeaua de telefonie mobilă LTE din Germania poate fi împărțită într-un număr de *hub*-uri, centrate în marile orașe: Berlin, München, Nürnberg, Hanovra, Hamburg și cele din valea Rinului.

Din punctul de vedere al calității, topologia hibridă ar funcționa mai bine aici, dar având în vedere cât de mare este rețeaua mobilă și luând în considerare faptul că, în general, nu există celule LTE de-a lungul autostrăzilor, există puține *handovers* LTE efectuate. Deci, topologia hibridă poate fi recomandată numai în zonele mai mici și nu este aplicabilă întregii rețele. Dezavantajul ar fi costurile acestei soluții propuse și dificultatea de implementare.

Rețeaua din Botswana, datorită topologiei sale, poate fi văzută că o rețea în inel, cu unele anexe



în locuri. HLR este situat în partea de sud-est a capitalei Gaborone. Există 2 legături principale originare aici, mergând în direcții diferite, nord-vest și nord-est și convergând în nord. O mare parte din traficul total de semnalizare și de interogare a rețelei utilizează aceste două legături.

Astfel, pe măsură ce rețeaua crește, riscul de congestie crește și el pe aceste legături, chiar și cu implementarea unor algoritmi de echilibrare a încărcării. De asemenea, în ceea ce privește riscul de dezastru natural, dacă una dintre astfel de cauze face că una din aceste legături să eșueze, este posibil că această să degenereze într-un efect de „bulgăre de zăpadă”.

O cauză a congestiei este că toată semnalizarea va avea o singură cale disponibilă, care ar fi singura care a rămas în stare de funcționare și care a fost proiectată să transporte numai anumite cantități de trafic. Aceste cantități includ un trafic zilnic obișnuit, nu exploziv.

Topologia distribuită oferă siguranță redundanței, deoarece soluția propusă ar aduce mai mult de un server NMS, gata să preia funcțiile unui nod nereușit. Un alt motiv este faptul că un număr de noduri situate în cele mai îndepărtate părți ale țării au legături unice care le leagă de principalele servere NMS. În cazul în care aceste legături ar fi întrerupte, atunci aceste zone nu vor mai fi acoperite, deoarece nu ar exista nicio legătură cu serverul principal NMS, pentru o topologie centralizată.



Cu o topologie distribuită, în caz de dezastru, fiecare zonă ar putea să ofere acoperire sau cel puțin posibilitatea de apelare. De asemenea, cea mai bună implementare în materie de calitate este topologia hibridă în funcție de zonă, riscul de dezastru, valorile traficului și așa mai departe. Cu toate acestea, deoarece aceasta nu este o rețea cu mulți utilizatori, costurile de implementare nu justifică utilitatea acesteia.

## 6.5. Realizare experimentală pe modele de trafic “live”

Intr-un laborator al rețelei Vodafone România, au fost aplicate configurările rețelei, care au fost simulate și cu ajutorul aplicației IxLoad. Astfel, concomitent cu fiecare test IxLoad, vor fi prezentate și graficele rezultate în urma simulărilor în laborator pe o rețea aflată în exploatare. Nivelurile de trafic real pe diferite perioade au fost capturate din punct de vedere al valorilor, nu al conținutului.

Simularea a luat în calcul faptul că toate eNodeB-urile au aceleași privilegii, fiecare are un modul funcțional SON și datele abonatului sunt păstrate în fiecare nod deoarece nu există niciun server HLR/VLR. Pentru o înțelegere mai ușoară, legăturile discutate la începutul acestei secțiuni au fost reduse la un număr mai mic de noduri. Simularea a injectat o cantitate mai mare de solicitări de apel, deoarece exploziile de trafic trebuie testate în caz de dezastru.

### 6.5.1. Testul 1 – trafic HTTP

Experimentul următor a urmărit să evidențieze traficul de date dintre abonați și un server HTTP, trafic care se poate realiza folosind interfețele S1 și S11. Interfața directă dintre eNodeB și MME este denumită sugestiv S1-MME. Interfața S11 face legătura dintre MME și SGW.

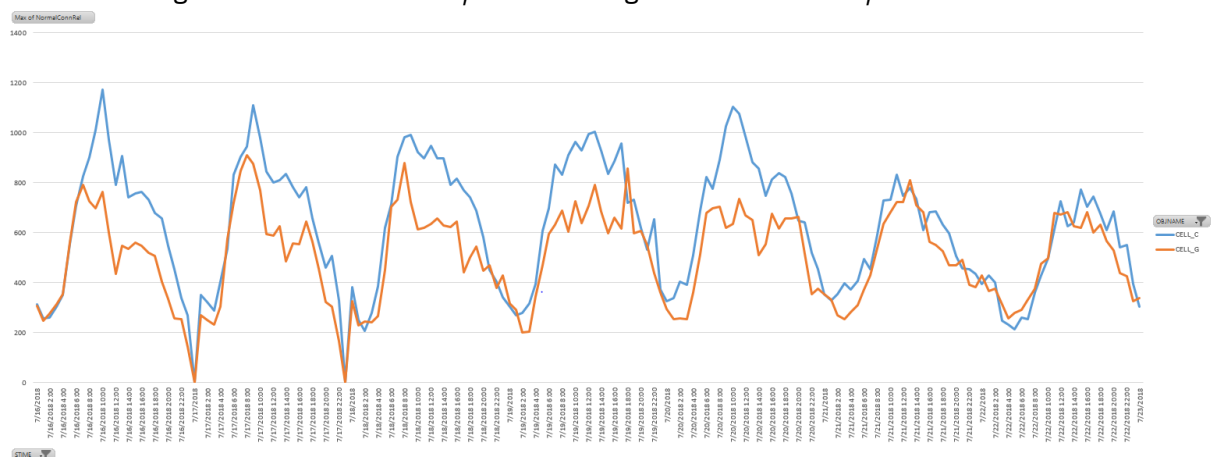


Fig. 119. Numărul de sesiuni încheiate cu succes

În figura 119, celula B prezintă un număr mai mare de conexiuni terminate cu succes decât celula F pe o durată de o săptămână. De aici rezultă faptul că celula B este cea preferată pentru deservirea sesiunilor de date.

Graficele sunt similare, arătând însă o performanță mai bună pentru celula B (cea simulată). Explicația constă în faptul că traficul HTTP este mult mai fragmentat decât cel FTP (nu se transmit fișiere mari) Prin urmare, sesiunile sunt mai multe și probabilitatea lor de a se încheia este mai mare.

### 6.5.2. Testul 2 – VoIP cu UDP

Pentru testul următor s-au considerat 40 de terminale timp de 6 minute, repetitiv. Traficul a fost însă ales să cuprindă date și VoIP cu transmisie prin protocolul UDP. Celula B (cea simulată) reprezentată de culoarea albastră are un debit marginal mai bun decât celula F (cea reală), reprezentată de culoarea portocalie.

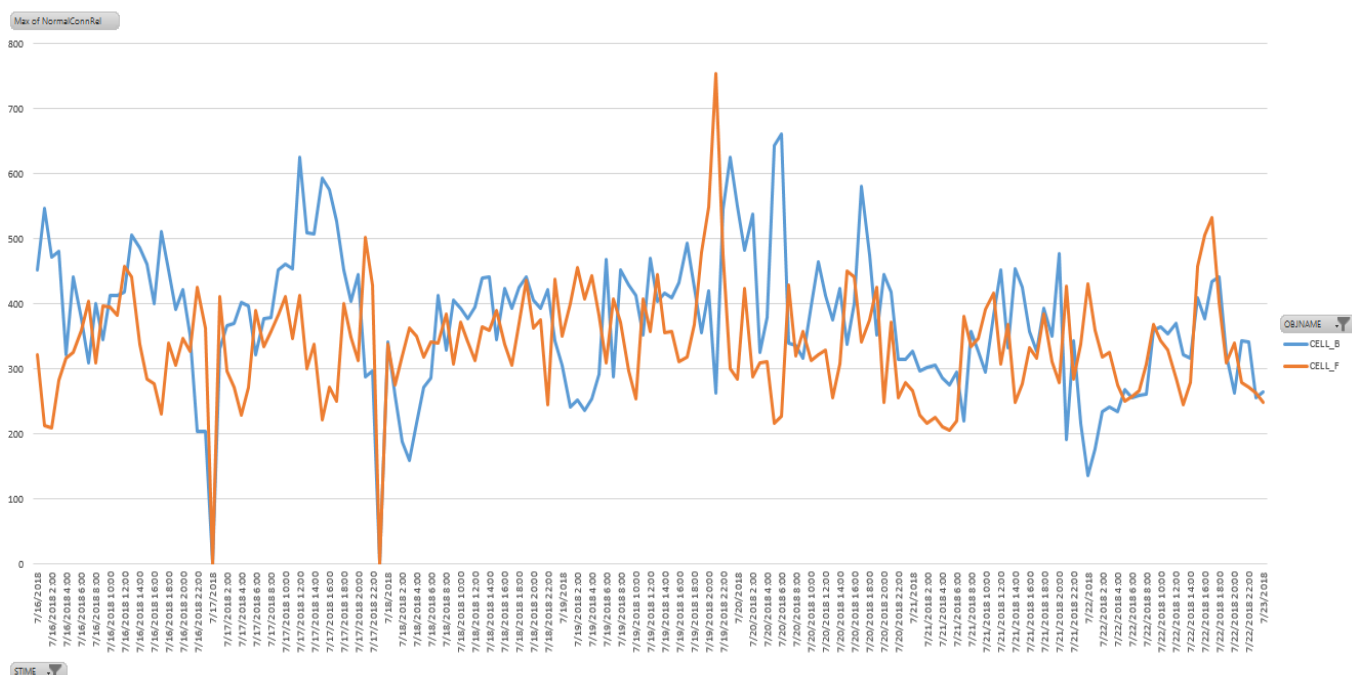


Fig. 122. Numărul de sesiuni încheiate cu succes

### 6.5.3. Testul 4 – attach storm

Am verificat capacitatea rețelei de a face față unui număr mare de proceduri de atașare și de detașare. Testul a presupus că 100 de abonați se atașează la rețea în fiecare secundă, timp de 905s.

Graficele sunt aproape identice deoarece atașarea la rețea nu mai este un aspect problematic în LTE și 3G.

De asemenea, procedura atașării unui terminal mobil la rețea nu presupune mulți pași de parcurs (sunt 26 de pași în total conform 3GPP), atât timp cât există o purtătoare disponibilă și nu există probleme legate de cheia de autentificare K, astfel încât o optimizare în acest proces nu prezintă relevanță.

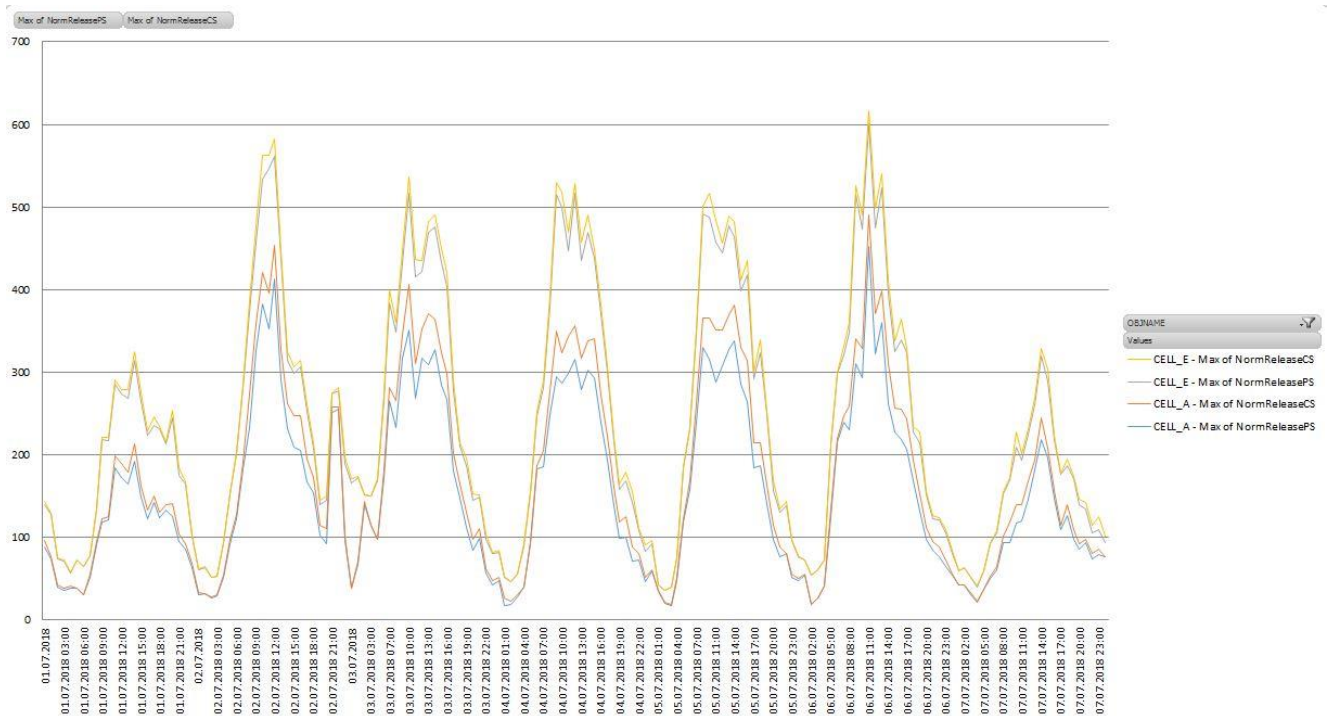


Fig. 129. Atașări și detașări

#### 6.5.4. Testul 5 – VoIP cu TCP

Mai departe au fost efectuate și câteva teste pentru verificarea funcționării VoLTE. Este nevoie din nou de introducerea protocolului GTP la nivelul planului de control, astfel fiind vorba de trafic la nivelul interfețelor S1 și S11. Testul a presupus apeluri SIP între 2 abonați ale aceleiași rețele.

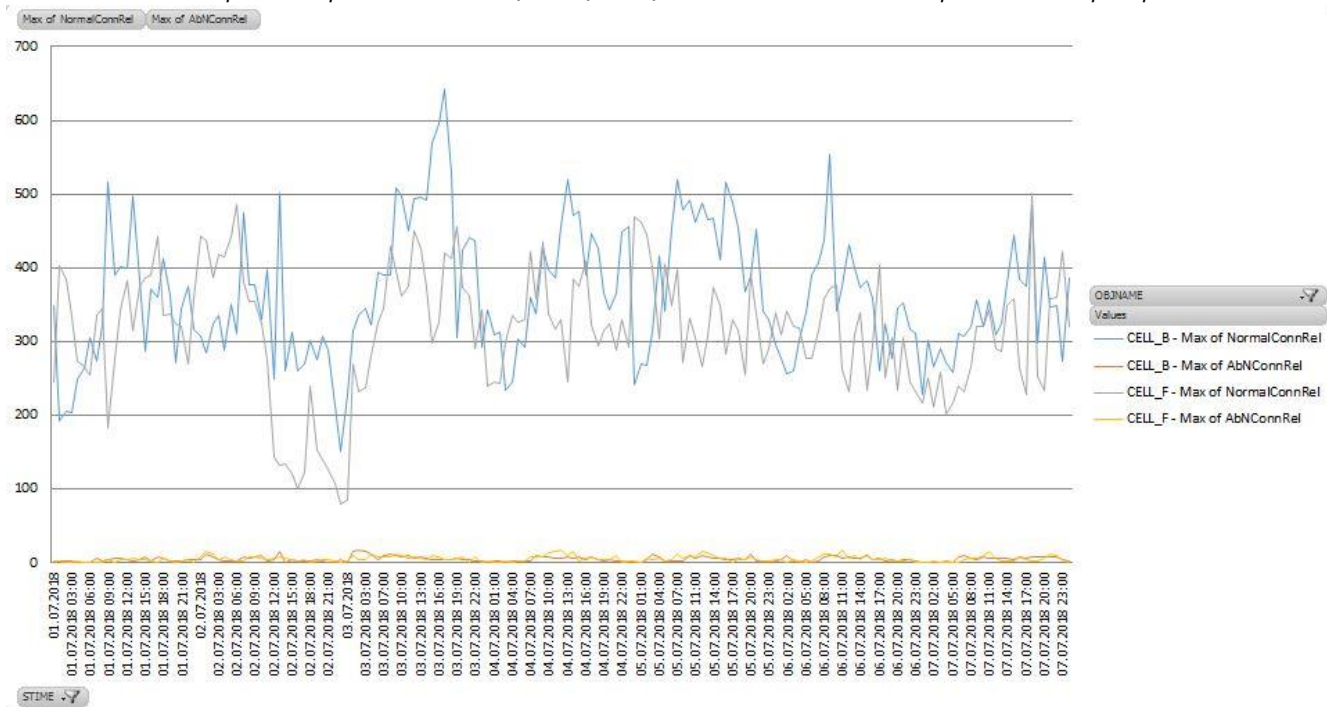


Fig. 131. Sesiuni SIP încheiate cu succes

Se observă o performanță semnificativ mai bună pentru celula B (albastru, cea simulată) față de celula F (gri, cea reală). Partea de semnalizare SIP nu este extrem de complexă însă ea constituie o încărcare adițională asupra semnalizării generale existente deja în rețeaua LTE.

### 6.5.5. Testul 6 – *stateless peer*

Următorul test a dorit să studieze traficul transportat pe interfața S5, atunci când la ambele capete ale sesiunii sunt conectați 2 abonați de tip "*stateless peer*". Noțiunea de "*stateless peer*" este modelată de către IXIA sub forma unui abonat care poate genera mai multe fluxuri de date transportate prin UDP sau IP simplu

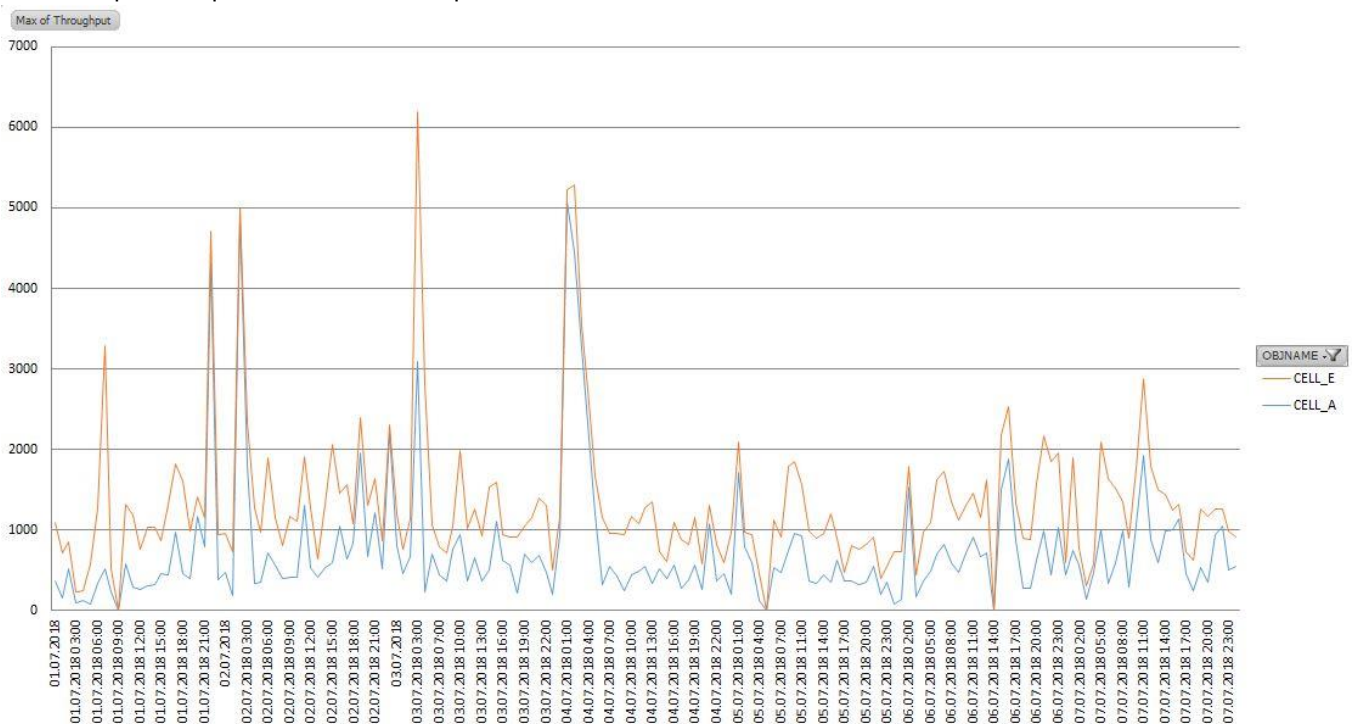


Fig. 134. Comparație debit celular pentru transmisii UDP

Se poate observa că dpdv al debitului traficului celulei E (cea simulată) este ușor mai mare decât cel al celulei A (cea reală).

Din aceste teste se poate astfel concluziona că celulele care au fost simulate ca aparținând unei rețele LTE în care este implementată tehnologia P2P (celulele B,C și E) afișează o performanță ușor îmbunătățită față de cazul real. Trebuie ținut cont și de faptul că simularea nu a putut cuprinde întregul spectru al condițiilor reale, ci doar a folosit modele de trafic care au încercat să se apropie cât mai mult de acestea.

## 6.6. Sumarul capitolului

Acest capitol a pornit de la principiile SON care sunt implementate în tehnologia LTE. Am propus introducerea arhitecturii *peer to peer* tocmai deoarece rețeaua LTE a fost concepută ca fiecare nod să aibă privilegii și capacități egale.

S-au sugerat posibile adaptări ale rețelelor LTE la topologiile P2P, inclusiv adaptarea la o procedură obișnuită de integrare a unui eNodeB. Totodată au fost aduse în discuție și dezavantajele folosirii P2P, în speță prezența problemelor legate de întâzieri și securitate.

În continuare a fost prezentat un studiu de caz pentru aplicarea topologiilor hibridă (pentru o rețea din Germania) și stea (o rețea din Botswana). Cu ajutorul platformei de simulare IXIA și a capturilor de trafic real, am simulat o perspectivă a noilor performanțe a unor eNodeB-uri, dacă ar fi implementate egalitatea între noduri, conform P2P. Experimentul de validare a fost axat pe afișarea faptului că interogările multiple de semnalizare efectuate pe aceeași legătură de transmisie pot aglomera inutil legătura. În urma acestui experiment a rezultat faptul că o modificare a arhitecturii LTE către P2P permite un volum mai mare de apeluri și abilitatea rețelei de a rezista la explozii de trafic.

Un alt experiment a folosit aplicația IxLoad pentru a testa diferențele de încărcare posibile, iar aceasta s-a făcut concomitent pe modele de trafic real. Acest trafic real a fost capturat sub formă de imagini care durează între 12 și 48 de ore și din care nu poate fi extrasă informația utilă, ci doar valorile traficului în scopul operării diferitelor experimente asupra acestuia.

Din cele discutate anterior, putem privi tehnologia P2P ca fiind implementabilă în 3 zone ale unei rețele LTE, toate 3 având proprietăți similare (Figura 135).

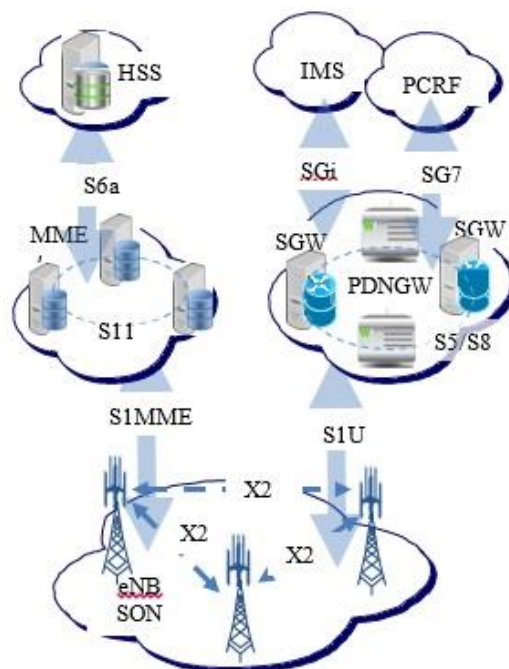


Fig. 135. Împărțirea în cele 3 zone ale unei rețele LTE

Astfel, putem împărți rețeaua LTE în trei regiuni: cea care cuprinde întregul număr de eNodeB-uri, sectorul populat de SGW-s și PGW-s, și ultimul, cel care este responsabil de funcția de control în rețea - echipamentele MME. În fiecare regiune se pot aplica principiile P2P, aceasta reducând și gradul de inter-dependență dintre echipamente. Diferența principală dintre aceste zone constă în alegerea topologiei optime în funcție de scopul fiecăreia.

## 7. Concluzii generale si contribuții originale

Acest capitol cuprinde concluziile generale ale cercetării privind optimizările și îmbunătățirile asupra diverselor secțiuni ale unei rețele LTE. Sunt prezentate contribuțiile originale și validarea acestora în comunitatea științifică internațională. De asemenea sunt discutate posibile direcții de continuare a cercetărilor.

Contribuțiile propuse în această lucrare pentru o rețea LTE nu acoperă o singură arie a acestei rețele. Dimpotrivă, ele aduc în discuție o gamă variată de optimizări, majoritatea acestora ținând către reducerea riscului de congestie, fie ea congestie a traficului de voce, de date, sau a traficului de semnalizare.

Un punct de interes al lucrării de față a fost simplificarea întregii rețele a unui operator, pornind de la premisa că acesta are în folosință atât rețeaua LTE cât și rețelele vechi, 2G și 3G. O singură rețea mobilă, de oricare generație ar fi aceasta, ridică ea însăși suficiente probleme, însă acestea se multiplică odată cu adăugarea altor tehnologii, de generație diferită. Dincolo de interfațarea acestor rețele se pune problema echilibrării încărcării lor, concomitent cu oferirea de servicii de o calitate cât mai bună abonaților.

Tehnologiile așa-numite "*peering*" distribuie diferite aplicații sau încărcări de trafic prin noduri de rețea cu privilegii egale. Fiecare dintre acestea pune la dispoziție o parte a resurselor de care dispune, de exemplu putere de procesare, spațiu de stocare sau lățime de bandă astfel încât acestea să poate fi folosite de către alți membri ai rețelei. Aceste funcții se efectuează fără a fi nevoie de coordonarea unui nod ierarhic superior, cum ar fi un server. Membrii rețelei sunt în același timp atât consumatori cât și furnizori de resurse. În acest sens am efectuat o paralelă între tehnologiile LTE și P2P, susținută de scenarii cu trafic real în care am arătat că introducerea unor principii P2P are ca rezultat eficientizarea resurselor și protecția rețelei mobile la eventuale încărcări bruște de trafic.

În continuare, am analizat subiectul traficului în rețelele LTE din trei perspective diferite: pe de o parte al eficientizării și evitării congestiei acestuia, iar pe de altă parte, al restricționării lui, printr-un studiu de caz asupra dronelor care încearcă să pătrundă într-un spațiu interzis, folosind contra-măsura bruiajului de semnal LTE. Totodata am adus în discuție și cazul tipului de trafic aflat într-o continuă creștere odată cu introducerea comunicațiilor mobile de banda largă (*broadband*), trafic care este cel mai predispus la generarea de blocaje în rețea, datorită naturii sale explozive, traficul video.

De-a lungul stagiului de doctorat, prin efortul de colaborare universitate-industrie, am reușit validarea unei părți importante a cercetărilor aplicative în scenarii simulate în laboratoare Ericsson și ale operatorului Vodafone care folosește echipamente Huawei, rezultatele fiind prezentate în capitolele 2 și 6 și valorificate printr-o serie de publicații (articolele 7.3.4.9 și 7.3.1.4). De asemenea analizele asupra proceselor HARQ au fost efectuate în laboratoarele operatorilor suedezi Telenor și Tele2 (capitolul 4, articolul 7.3.4.14). Validarea studiului asupra stratului fizic a putut fi posibilă mulțumită laboratorului poli-tehnologic al operatorului italian H3G (articolul 7.3.5.15). Operatorul danez TDC (*Tele Danmark Communications*) mi-a permis testarea diferitelor soluții multimedia prin LTE (capitolul 5, articolele 7.3.1.5 și 7.3.2.6).

## 7.1. Principalele contribuții originale

O mare provocare pentru cercetările aplicative în rețele mari de acces o reprezintă baza experimentală, infrastructura deosebit de pretențioasă, dificil de manipulat și reconfigurat, atât la producătorii de echipamente cât și la operatorii de rețea (unde resursele sunt permanent implicate în exploatarea comercială).

- © O contribuție în acest sens este integrarea unui mediu dedicat pentru ingineria traficului cu control cvasi-complet al nivelelor OSI cu posibilități de emulare a încărcării, a congestiei (*load and stress*) a unor scenarii diverse (inclusiv avarii) și chiar bruiaj („*jamming*”).

Anvergura cercetărilor în rețeaua de acces impune laboratoare la nivel de furnizor de echipamente sau la nivel de operator. Cea mai apropiată de nivelul acestor cercetări aplicative este infrastructura de rețea a operatorului, însă aceasta se găsește într-o perpetuă exploatare unde se pot face observații, capturi (*tracefiles, logfiles*) pe analizoare și monitoare de protocol, nu însă și intervenții inovative asupra unor configurații și proceduri, întrucât pot fi afectate fluxurile de date ale abonaților la toate nivelele începând cu comunicațiile *enterprise* (indicele de disponibilitate, QoS șamd).

Pe de altă parte, la nivelul producătorilor și furnizorilor de echipamente, testarea are loc mai degrabă la nivel de subsistem chiar dacă se face preconfigurare și rodaj – *staging* – fiind rareori integrate configurații mari pentru a se rula scenarii complexe. De aceea soluția propusă de mine oferă un mediu complex de ingineria traficului, versatil, capabil să creeze o încărcare până la nivel de congestie – *load and stress*, inclusiv scenarii de bruiaj (*jamming*) și aplicații militare.

Această soluție complexă a fost folosită la validarea soluțiilor propuse în capitolele 2, 3 și 6.

Aplicabilitatea deosebită a acestor soluții a extins capacitățile laboratorului de comunicații avansate din cadrul centrului de cercetare C13 al ICDT.

- © Am configurat platforma dedicată "*all IP*", de inginerie a traficului în rețelele de acces intermodale, pentru simularea traficului de voce și date de tipuri multiple (HTTP, RTSP, FTP etc) concomitent pe rețele aparținând unor tehnologii mobile de generații diferite (2G, 3G, 4G).
  - Am facilitat extinderea funcțiilor de *Monitorizare-Emulare* în funcții de *Măsurare* a traficului și, respectiv, de *Control*, prin augmentarea platformei de ingineria traficului, sistemul *all IP* „Optixia IP Performance Tester” cu capacități de aplicații pentru tehnologia mobilă de generația a 4-a, LTE, care poate simula până la 1000 de terminale mobile cu capacități LTE, împreună cu rețeaua de acces și cea *core*, în multiple condiții de funcționare cât mai aproape de cazurile reale.

[descriere în sub-capitolul 2.1 și demonstrații în capitolele 2, 4 și 6]

Controlabilitatea a coborât către nivelele inferioare ale stivei OSI întrucât soluțiile clasice (replanificare radio TMN 3000 care presupune gestionarea erorilor, conturilor, performanțelor, configurațiilor și a securității) sunt bazate mai mult pe reconfigurarea harților radio cu sisteme de antene inteligente care preiau acoperirea celulelor cu probleme.

Meritul acestei abordări este că se face de sus în jos („*top-down*”), deci se face funcțional pornind de la însăși poziția superioară a nivelelor *software* în ierarhia OSI. Un avantaj al acestei „granularități”, a programabilității de detaliu, rezidă în posibilitatea de securizare la nivele joase, printr-o pluralitate de unități *software* orizontale care completează straturile *software* verticale.

- © Am integrat astfel un sistem cu valențe L&S (*load and stress*), RET (*Real Equipment Testing*) și IOT (*Interoperability Testing*), lucru pe care l-am demonstrat introducând în sistemul de analiză protocol o serie de capturi de fluxuri de semnalizare de la operatori și colaboratori din domeniul comunicațiilor mobile.

[descriere în capitolul 3, validare și diseminare în cadrul articolului 7.3.1.1]

- © Am construit o rețea radio definită *software* cu mai multe noduri SDR (*Software Defined Radio*) bazată pe
  - *Hardware* → trei echipamente National Instruments ETTUS Research USRP (*Universal Software Radio Peripherals*) model B210 (70MHz-6GHz și MIMO 2x2);
  - *Hardware* → două echipamente Analog Devices – tip FDCOMMS2 bazate pe circuitul integrat AD9361 cu acoperire RF continuă 70MHz – 6 GHz, funcționare full duplex cu bandă 200 kHz – 56 MHz;
  - *Software* → aplicația *opensource* „srsLTE”, care creează o rețea *end-to-end* definită *software* (SDR), prin cele 3 blocuri care simulează componentele rețelei LTE (srsEPC – rețeaua *core* cu implementări pentru MME, HSS, SGW și PGW; srsENB – stație de bază 4G; srsUE – utilizatori simulați), instalată și optimizată pentru apeluri de date atât în rețeaua privată cât și cu ieșire în cele comerciale, totul în limitele legalității;
  - *Software* → aplicație pentru programarea de cartele SIM și SIM-uri LTE care pot fi rescrise în scopul diferitelor lucrări de laborator, inclusiv teste de securitate *low level*, cu acces la „cheile” cartelei și ale operatorului;
  - *Software* → implementare Wireshark pentru captura, analiza, decriptarea și interpretarea înregistrărilor „logs” în scopul înțelegerii cât mai amănunțite a comunicației 4G și a entităților participante;



Integrarea "de sus în jos" a controlabilității SDR National Instruments s-a făcut cu sub-sistemele *software* LabVIEW SDR Tool-Kit, LabVIEW Communications System Design Suite și cu driver-ele NI-USRP 19.5.

Contribuțiile în domeniul sistemelor de acces definite *software* vin să întregescă mediul complex de testare experimentală (platforma de ingineria traficului prezentată în capitolul 2) cu o capacitate sustenabilă, durabilă („*future proof*”) care poate fi adaptată la noi scheme de modulație și proceduri de emisie-recepție (radio cognitiv etc). Soluția pe care am integrat-o dispune de o versatilitate pronunțată, ceea ce-i permite utilizarea într-o vastă gamă de aplicații, inclusiv militare, datorită posibilității rapide de a-și modifica funcționalitatea. Un exemplu este soldatul responsabil cu telecomunicațiile care nu mai este nevoit să transporte în jur de 20 de echipamente radio în câmpul de luptă (deoarece fiecare radio este configurat pentru un serviciu sau pentru diferite forțe armate), ci doar unul care se poate reconfigura ad-hoc și care este semnificativ mai ieftin.

© Am realizat o rețea privată LTE funcțională cu desfășurare rapidă (*fast deployment*) care:

- Poate fi activă în mai puțin de 30 de secunde;
- Suportă benzile uzuale ale rețelelor LTE comerciale de 1,4, 3, 5, 10, 15 și 20MHz;
- Suportă MIMO și poate atinge viteza pe direcția *downlink* de 150Mbps pentru o bandă de 20MHz;
- În cazul SISO, viteza pe direcția *downlink* poate atinge 75Mbps;
- Suportă sesiuni de date cu viteze de până la 30 Mbps, limitarea principală fiind introdusă doar de suportul *hardware*;
- Emulează funcționalitatea aproape completă (detaliată) a unei rețele comerciale LTE, urmărind pașii instituți de 3GPP;
- Dispune de un HSS ușor de utilizat, astfel încât noi utilizatori pot fi adăugați prin simpla modificare a unui fișier de tip *csv*;
- Necesită doar un echipament SDR și o mașină de calcul (pentru a rula rețeaua *core* completă), spre deosebire de alte soluții care au nevoie de 2 mașini;
- Dispune de o versatilitate semnificativă datorită posibilității ușoare de a schimba banda de frecvență, numărul abonaților, schema antenelor, instalarea și modificarea bibliotecii srsLTE în scopul modificării funcționalității;

© Am adus rețeaua privată LTE la nivelul de *Technology Readiness 5 – Technology validated in relevant environment*. Am contribuit la crearea unei infrastructuri de cercetare integrată cu capabilități de programare, configurare dar și de monitorizare și emulare. Față de instalațiile industriale, soluția cu desfășurare rapidă are posibilități de relocare și extindere, scalabilitate a rețelei de acces și reconfigurabilitate a resurselor radio.

Luând în considerare orientarea rețelelor moderne de comunicații către all-IP am abordat calitatea serviciilor QoS de timp real, cu accent pe tehnica HARQ (*Hybrid ARQ*) cu corecție rapidă a erorilor FEC (*Forward Error Correction*).

- © Am propus o serie de metode de evaluare a performanței serviciilor bazate pe IP (*“over IP”* cu accent pe VoIP) în rețelele LTE prin simularea tehnicilor de programare a pachetelor – FD (*Fully Dynamic*) și SPP (*Semi Persistent Packets*), a vocoderelor și a metodelor de corecție a erorilor în condiții ideale și reale ale unui canal de transmisiuni.
- © De asemenea, am demonstrat că – deși în studiul bibliografic am găsit aprecieri că folosirea corecției erorilor prin retransmisie ARQ (*Automatic Repeat Request*) nu este satisfăcătoare pentru serviciile în timp real în rețele cu comutație de pachete – introducerea tehnicii HARQ aduce beneficii pentru QoS, atunci când este cuplată cu FEC.

[descriere în capitolul 4, validare și diseminare în cadrul articolului 7.3.4.14 ]

Necesitatea de a direcționa în mod optim traficul tuturor abonaților rețelei de telefonie mobilă, în contrast cu folosirea rețelelor vechi sau a celor noi și îmbunătățite, dar mai scump de implementat, devine o problemă greu de rezolvat la nivelul operatorilor de comunicații mobile.

În aceeași direcție orientată spre fluidizarea traficului într-o rețea LTE, am propus o serie de metode de coordonare a traficului între macro-celule LTE și 3G pe direcția *downlink*, având ca obiectiv maximizarea debitului de trafic, măsurat la terminalul abonatului.

Pe baza unui model teoretic de coordonare a traficului, am estimat cea mai bună echilibrare a distribuției de trafic între două rețele de generații diferite ale aceluiași operator. De asemenea am evaluat și impactul asupra capacităților terminalelor.

- © Am propus soluții de echilibrare și ghidare a traficului, bazate pe algoritmi de repartizare a traficului asupra a două rețele de generații diferite, punând în valoare patru metode speciale implementate și testate în condiții dinamice, pe platforma IXIA. Aceste soluții s-au bazat și pe o serie de contribuții pe care le-am adus la optimizarea resurselor radio, bazate pe tehnici de replanificare radio.
  - Am aplicat metoda aleatoare, o metodă de tip static, ușor de implementat, care are efect pe o perioadă îndelungată, deoarece, în medie, câte o jumătate dintre abonați sunt direcționați către fiecare sub-rețea.
  - Am aplicat metoda tehnicilor echilibrate în care este nevoie să fie cunoscută capacitatea fiecărei sub-rețele. Această metodă are scopul de a anticipa încărcările care pot surveni, și distribuie traficul suplimentar, astfel încât oricare dintre sub-rețelele disponibile să nu devină congestionată.
  - Am aplicat metoda evitării congestiei abonaților, o metoda dinamică, care studiază încărcările instantanee de trafic și trimite apelurile abonaților pe sub-rețeaua cu încărcare mai mică, astfel încât suplimentul de trafic să nu aglomereze o sub-rețea, iar capacitățile celorlalte să rămână nefolosite sau slab încărcate.

- Am aplicat metoda congestiei traficului, care presupune estimarea unei medii de trafic suportată de fiecare su-rețea, din punct de vedere al unui abonat care se conectează la rețea. Astfel, va putea fi aleasă sub-rețeaua potrivită în funcție de media volumului de trafic posibil efectuat de un abonat.
- © Am identificat cea mai bună metodă pentru evitarea congestiilor în funcție de integrarea LTE, volumul de trafic și capacitățile LTE ale abonaților, pentru majoritatea tipurilor de rețele și operatori existenți pe piață.
- © Am demonstrat că, la un nivel complet de integrare al tehnologiei LTE, metoda dinamică a traficului mediu prezintă rezultate mult mai bune decât toate celelalte metode discutate.
- © Am demonstrat faptul că metodele evitării congestiei și cea a traficului mediu, prezintă un avantaj doar când tehnologia LTE este accesibilă pentru aproximativ 70% dintre abonații rețelei. Dacă acest nivel nu este atins, am demonstrat că rezultatele metodelor dinamice sunt egale de cele ale metodei statice, a "tehnicilor echilibrate". Momentul recomandat pentru trecerea de la o metodă la alta depinde de volumul de trafic și de capacitățile abonaților de a se conecta la tehnologia LTE.

*[descriere in capitolul 2, validare și diseminare in cadrul articolului 7.3.4.9]*

Am abordat problema fluidizării traficului și din direcția opusă, a blocării intenționate (bruiajului) a acestuia. În contextul *load & stress*, am studiat problema de actualitate a spațiilor aeriene private care doresc restricționarea accesului dronelor. Dronele comerciale au cunoscut o răspândire accentuată odată cu apariția celor cu capacități 4G, deoarece această tehnologie elimină problema lor principală și anume necesitatea de LoS (Line of Sight – linia vizuală directă dintre dronă și pilot). A fost astfel inevitabil ca apariția în spațiile aeriene private să nu devină o problemă a operatorilor care beneficiază de licența 4G (incidentul aeroportului Gatwick, Marea Britanie, 2018).

- © Am prezentat o soluție de restricționare a pătrunderii dronelor într-un spațiu interzis, pe care am testat-o cu succes în spațiul Universității "Transilvania" Brașov, fără ca semnalul util al altor utilizatori ai aceleiași rețele comerciale 4G să fie perturbat în mod clar.

*[descriere in capitolul 2, validare și diseminare in cadrul articolului 7.3.1.3]*

Urmând direcția de eficientizare a traficului unei rețele mobile LTE, am considerat necesară introducerea unui studiu asupra traficului cel mai inconstant, care poate surveni în rafale, deci cel mai solicitant pentru rețea, și anume traficul video. Primul criteriu luat în calcul pentru transmisia unui flux video este calitatea acestuia, iar în cazul de față trebuie ținut cont de faptul că traficul video este de natură explozivă iar acesta poate genera brusc pericol de congestie, spre deosebire de traficul de date obișnuit. În funcție de diferitele cazuri particulare aplicabile în provocările cu care se confruntă fiecare operator, acesta își va putea configura din start rețeaua într-un mod optim.

- © Am propus o metodologie de evaluare a capabilităților video a rețelelor LTE care folosesc tehnici MIMO (*Multiple Input and Multiple Output*) bazate pe antene multiple.
- © Am abordat mobilitatea abonaților luând în considerare și deplasarea cu viteze diferite, pentru a putea folosi câștigurile diferite ale antenelor. Am folosit ca referință descărcarea de fluxuri video în timp real.
- © Am validat metodologia de analiză prin demonstrarea beneficiilor tehnicii MIMO cu 4x2 transmițătoare față de SU (*Single User*) MIMO 2x2, pe direcția *downlink*, arătând că utilizarea tehnicii 4x2 crește capacitatea rețelei LTE cu 30% - 50% (în funcție de viteza de deplasare a abonaților) în raport cu tehnica 2x2.

*[descriere in capitolul 2, validare și diseminare in cadrul articolului 7.3.2.6]*

Tehnologia LTE a fost proiectată mai ales pentru traficul de date și nu preponderent pentru cel de voce. Însă, în ziua de azi, nu se poate concepe ca o rețea de telefonie mobilă să nu ofere suport pentru voce. Astfel, trebuie asigurată posibilitatea traficului de voce sau neîntreruperea acestuia atunci când abonații se deplasează în afara ariei de acoperire a rețelei LTE.

- © Am reușit construcția unei rețele demonstrative pentru comunicație vocală prin LTE - Demonstrator cu IMS (*IP Multimedia Server*) pentru comunicații vocale prin LTE (VoLTE – *Voice over LTE*), care a avut scopul de a monitoriza și valida funcționalitatea IMS în rețeaua LTE, folosind simulatorul 4Gsim și OpenIMS.

*[descriere in capitolul 5, validare și diseminare in cadrul articolului 7.3.1.5]*

Utilitatea cercetărilor pe care le-am efectuat pornește de la prezumția că rețeaua LTE nu va trece în viitor prin schimbări majore, fie din cauza că cerințele utilizatorilor sunt satisfăcute, fie din cauza că dezvoltarea rețelelor mobile are ca obiect saltul către tehnologia 5G. Lucrarea a abordat complexitatea rețelei LTE din diferite unghiuri și a propus optimizarea și eficientizarea acesteia în punctele actual problematice.

Se poate afirma faptul că atunci când va apărea un deranjament într-o rețea cu tehnologii amalgamate, costurile mentenanței vor fi aproximativ dublate deoarece această eroare nu va putea fi izolată într-un singur punct, ci ea va fi legată de componentele deja existente ale celorlalte rețele de generații diferite.

- © Am propus o împărțire funcțională a rețelei LTE în 3 sub-rețele de acces, în scopul implementării principiilor *peer-to-peer*. Prima zonă cuprinde toate eNodeB-urile, a doua reprezintă SGW (*Serving Gateway*) și PGW (*Packet Data Network Gateway*), iar ultima reprezintă echipamentele MME (*Mobile Management Entity*) care sunt responsabile de controlul rețelei.
  - Această abordare a avut în vedere un grad cât mai mare de independență a celor trei regiuni ale rețelei radio LTE, favorizând o determinare facilă a unui deranjament sau apariția previzibilă a unei congestii de trafic.

- Am justificat în acest fel asigurarea celor mai bune performanțe din punct de vedere al extinderii rețelei, al echilibrării încărcării rețelei, al funcționării sigure, luând în considerare și prețul implicat pentru atingerea acestor deziderate.
  - Am identificat topologia *peer to peer* optimă în funcție de scopul fiecăreia din aceste trei sub-rețele.
- © Am formulat un set de criterii de evaluare a performanței operaționale utilizate pe parcursul cercetarilor aplicative în vederea utilizării rețelelor de acces:
- Numărul maxim de sesiuni;
  - Suport pentru creșterea în rafale a traficului de semnalizare și date;
  - Accelerarea procedurilor de *handover*;
  - Riscul redus de congestie în cazul unor evenimente critice;

Ambele tehnologii discutate în acest studiu, *peer to peer* și LTE, se află încă în evoluție. În ciuda problemelor de securitate care din păcate se regăsesc în tehnologia P2P, câteva caracteristici care nu au nicio legătură cu acest dezavantaj pot fi implementate cu succes în tehnologia LTE. Am concentrat cercetările pe minimizarea riscului de congestie (asupra traficului de date și al semnalizării) ale tehnologiei P2P cu scopul de a optimiza tehnologia LTE.

- © Am validat măsurile propuse pentru a minimiza riscul de congestie pe studii de caz fundamentate pe scenarii reale, cu ajutorul unor aplicații care pot emula performanțele IP ale echipamentelor LTE. Conceptual și practic, aceste soluții pot îmbunătăți planificarea și traficul rețelei radio în LTE.

*[descriere în capitolul 6, validare și diseminare în cadrul articolului 7.3.1.4]*

## 7.2. Direcții viitoare de cercetare

În urma cercetărilor expuse mai sus, propun următoarele direcții posibile de cercetare :

- Egalizarea privilegiilor fiecărui nod al rețelei radio de acces 4G, în cazul de față un eNodeB, reprezintă punctul comun de la care se poate pleca în cercetarea unor soluții de *peering* în 4G și 5G.
- Pe măsură ce Institutul Fraunhofer, dezvoltatorul aplicației OpenIMS Core adaugă noi pachete de *software* care simulează diferite componente ale rețelei LTE, funcționalitatea soluției cu demonstrator IMS propuse în capitolul 5 poate fi extinsă.
- Introducerea de aplicații prin rețeaua privată LTE precum :
  - folosirea unui senzor pentru măsurarea temperaturii la intrarea într-o clinică medicală și trimiterea datelor pentru analiză către un server cu o bază de date. Baza poate aparține clinicii sau poate fi sincronizată cu o bază de date națională;
  - supravegherea unei incinte cu o serie de camere video;
  - monitorizarea unei incinte cu senzori de temperatură, umiditate, mișcare;
- Adăugarea unui nou strat peste rețeaua privată srsLTE, folosind softul 5G-EmPOWER, cu scopul de a gestiona rețeaua de la un nivel superior și de a-i mari capabilitățile și modularitatea spre o posibilă extindere către 5G.

## 7.3. Validarea și diseminarea rezultatelor științifice

### 7.3.1. Lucrări proprii indexate ISI

## Web of Science



Search Tools ▾ Searches and alerts ▾ Search History Marked List

Sort by: Date ▾ Times Cited Usage Count Relevance More ▾ ◀ 1 of 1 ▶

Select Page

1. **Open-LTE Call Emulator in Software Defined Radio**  
By: Curpen, Radu; Fernoaga, Vlad; Robu, Dan; et al.  
Conference: 18th Annual RoEduNet Conference on Networking in Education and Research (RoEduNet) Location: Dunarea Jos Univ Galati, Galati, ROMANIA Date: OCT 10-12, 2019  
Sponsor(s): IEEE; RoEduNet, Agentia Administrare Retelei Nationale Informatica Educatie Cercetare; IEEE Romanian Sect  
2019 18TH ROEDUNET CONFERENCE - NETWORKING IN EDUCATION AND RESEARCH (ROEDUNET) Book Series: RoEduNet International Conference Published: 2019  
[View Abstract ▾](#)

2. **Multichannel Software Defined Radio with Spectral Decision via Centralized Artificial Intelligence**  
By: Fernoaga, Vlad; Curpen, Radu; Nutiu, Cosmin; et al.  
Conference: 18th Annual RoEduNet Conference on Networking in Education and Research (RoEduNet) Location: Dunarea Jos Univ Galati, Galati, ROMANIA Date: OCT 10-12, 2019  
Sponsor(s): IEEE; RoEduNet, Agentia Administrare Retelei Nationale Informatica Educatie Cercetare; IEEE Romanian Sect  
2019 18TH ROEDUNET CONFERENCE - NETWORKING IN EDUCATION AND RESEARCH (ROEDUNET) Book Series: RoEduNet International Conference Published: 2019  
[View Abstract ▾](#)

3. **Assessment of Signal Jamming Efficiency against LTE UAVs**  
By: Curpen, Radu; Balan, Titus; Miclos, Ioan Alexandru; et al.  
Conference: 12th IEEE International Conference on Communications (COMM) Location: Bucharest, ROMANIA Date: JUN 14-16, 2018  
Sponsor(s): Mil Tech Acad Ferdinand I; Politehnica Univ Bucharest; Electronica Fdn; Orange; RomTek Elect; HUAWAI; MarcTel; T; C4 SYS; TERRASIGNA; Tellence; ROMKATEL; ROHDE&SCHWARZ; HV Optoelectronica; Interact Syst Engn; Beia; IEEE  
2018 12TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS (COMM) Book Series: IEEE International Conference on Communications Pages: 367-370 Published: 2018  
[View Abstract ▾](#)

4. **Peer Control Solutions for Improving LTE Access Networks**  
By: Curpen, Radu; Robu, Dan-Nicolae; Sandu, Florin; et al.  
Conference: International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) / Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) Location: Transilvania Univ Brasov, Brasov, ROMANIA Date: MAY 25-27, 2017  
Sponsor(s): Univ Politehnica Timisoara; Tech Univ Cluj Napoca; Middle E Tech Univ Ankara; Inst Elec & Elect Engineers; IEEE Ind Elect Soc; IEEE Ind Applicat Soc; IEEE Power Elect Soc; Inst Elect Engineers Japan; Korean Inst Power Elect  
2017 INTERNATIONAL CONFERENCE ON OPTIMIZATION OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC EQUIPMENT (OPTIM) & 2017 INTL AEGEAN CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES AND POWER ELECTRONICS (ACEMP) Pages: 947-952 Published: 2017  
[View Abstract ▾](#)

5. **Demonstrator for Voice Communication over LTE**  
By: Curpen, Radu; Balan, Titus; Sandu, Florin; et al.  
Conference: 10th International Conference on Communications (COMM) Location: Bucharest, ROMANIA Date: MAY 29-31, 2014  
Sponsor(s): Politehnica Univ Bucharest; Orange; Ericsson; Huawei; Romkatel; IDQ; ITBS; Technol Excellence; Pro Optica; Kapsch; Commun Test Syst; Electronica 2000 Fdn; Acad Stiinte Tehnice; Mil Tech Acad  
2014 10TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS (COMM) Published: 2014  
[View Abstract ▾](#)

**Analyze Results**  
**Create Citation Report**

Times Cited: 0  
*(from Web of Science Core Collection)*  
Usage Count ▾

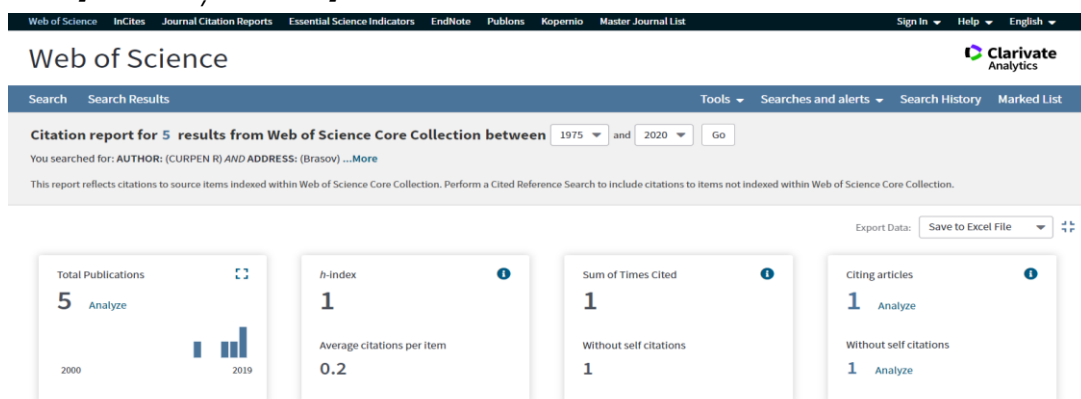
Times Cited: 0  
*(from Web of Science Core Collection)*  
Usage Count ▾

Times Cited: 1  
*(from Web of Science Core Collection)*  
Usage Count ▾

Times Cited: 0  
*(from Web of Science Core Collection)*  
Usage Count ▾

Times Cited: 0  
*(from Web of Science Core Collection)*  
Usage Count ▾

- [1] Curpen, R., Fernoaga, V., Robu, D., & Sandu, F. (2019, October). Open-LTE Call Emulator in *Software Defined Radio*. In 2019 18th RoEduNet Conference: Networking in Education and Research (RoEduNet) (pp. 1-6). IEEE. *[indexată și SCOPUS]*
- [2] Fernoaga, V., Curpen, R., Nutiu, C., & Sandu, F. (2019, October). Multichannel *Software Defined Radio* with Spectral Decision via Centralized Artificial Intelligence. In 2019 18th RoEduNet Conference: Networking in Education and Research (RoEduNet) (pp. 1-6). IEEE. *[indexată și SCOPUS]*
- [3] Curpen, R., Bălan, T., Micloș, I. A., & Comănici, I. (2018, June). Assessment of signal jamming efficiency against Ite UAVs. In 2018 International Conference on Communications (COMM) (pp. 367-370). IEEE.
- [4] Curpen, R., Robu, D. N., Sandu, F., & Amarandei, A. (2017, May). Peer control solutions for improving LTE access networks. In 2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) (pp. 947-952). IEEE.
- [5] Curpen, R., Bălan, T., Sandu, F., Costache, C., & Cerchez, C. (2014, May). Demonstrator for voice communication over LTE. In 2014 10th International Conference on Communications (COMM) (pp. 1-4). IEEE. *[indexată și SCOPUS]*



Dintre acestea, 3 articole sunt indexate și în SCOPUS:

(AUTHOR-NAME (curpen AND r) AND AFFILIATION (brasov))

Document title	Authors	Year	Source	Cited by
1 Multichannel Software Defined Radio with Spectral Decision via Centralized Artificial Intelligence	Fernoaga, V., Curpen, R., Nutiu, C., Sandu, F.	2019	Proceedings - RoEduNet IEEE International Conference 2019-October,8909454	0
2 Open-LTE Call Emulator in Software Defined Radio	Curpen, R., Fernoaga, V., Robu, D., Sandu, F.	2019	Proceedings - RoEduNet IEEE International Conference 2019-October,8909862	0
3 Demonstrator for voice communication over LTE	Curpen, R., Bălan, T., Sandu, F., Costache, C., Cerchez, C.	2014	IEEE International Conference on Communications 8868763	0

7.3.2. Alte lucrări indexate într-o bază de date recunoscută de comisia CNATDCU de specialitate - *DBLP (Digital Bibliography & Library Project) – De Gruyter*

**[6] Curpen, Radu ;** Balan, Titus ; Socea, Fabian ; Sandu, Florin - An analysis of the video capabilities of multiple antenna LTE networks - Proceedings of the 5th International Conference on Recent Achievements in Mechatronics, Automation, Computer Sciences and Robotics - MACRo 2015 - Volume 2, Issue 1. Pages 87-95.

**[7] Mihăilă, Paul ;** Bălan, Titus ; **Curpen, Radu ;** Sandu, Florin - Network Automation and Abstraction using Python Programming Methods - Proceedings of the 5th International Conference on Recent Achievements in Mechatronics, Automation, Computer Sciences and Robotics - MACRo 2015 - Volume 2, Issue 1. Pages 95-103.

7.3.3. Lucrări proprii indexate în BDI EBSCO

**[8] GA Stelea, C Gavrilă, S Zamfir, R Curpen,** "Face Recognition for Education in the Cloud ", - eLSE: International Scientific Conference - eLearning and *Software* for Education - 2017, Vol. 2, p181-188. 8p. - doi.org/10.12753/2066-026x-17-111 – Bucharest - April 2017;

7.3.4. Articole publicate în reviste românești recunoscute de CNCSIS – categoria B+

**[9] Curpen, R.,** Iliescu, M. I., & Sandu, F. (2016). AN ANALYSIS OF 3G-4G TRAFFIC GUIDANCE METHODS. *Review of the Air Force Academy*, (2), 123.

**[10] Machidon, O. M.,** Balan, T. C., & **Curpen, R.** (2013). CLOUD PERSPECTIVE ON RECONFIGURABLE *HARDWARE*. *Review of the Air Force Academy*, (2), 23.

**[11] Curpen, R.,** Sandu, F., Costache, C., & Danciu, G. M. (2013). SOLUTIONS FOR *ROAMING* AND INTEROPERABILITY PROBLEMS BETWEEN LTE AND 2G OR 3G NETWORKS. *Review of the Air Force Academy*, (2), 29.

**[12] Radu CURPEN,** Andrada-Elena NICOLESCU, Catalina-Maria NICOLESCU, Dan-Nicolae ROBU "QoS Study in an USRP Private LTE Network", 2019, Bulletin of the "Transilvania" University of Brasov

**[13] Stelea, G. A., Curpen, R.,** Surariu, S., & Papoi, A. (2016). PEER-TO-PEER REAL-TIME CLOUD COMMUNICATION SOLUTIONS. *Review of the Air Force Academy*, (2), 99.

**[14] Curpen, R.,** Zamfir, S., Iliescu, I., & Balan, T. (2016). PERFORMANCE ANALYSIS OF VoIP SERVICES IN LTE NETWORKS. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Engineering Sciences. Series I*, 9(2), 29.

7.3.5. Lucrări proprii publicate în volumele cu ISSN ale unor conferințe internaționale, cu comitet de recenzori

**[15] Radu CURPEN,** Florin SANDU, Titus Constantin BALAN, Cosmin COSTACHE, A Physical Layer Performance Analysis of LTE and Mobile WiMAX - Proceedings of the 4th International Conference



on Recent Achievements in Mechatronics, Automation, Computer Sciences and Robotics - MACRO 2013, Tg.Mureş – RO, ISSN 2247-0948

**[16]** Titus Constantin BALAN, Anca Victoria HADADE, Octavian Mihai MACHIDON, **Radu CURPEN** – Service Creation Environment for Distributed Telecom Infrastructure - IaaS, Proceedings of the 4th International Conference on Recent Achievements in Mechatronics, Automation, Computer Sciences and Robotics - MACRO 2013, Tg.Mureş – RO, ISSN 2247-0948

7.3.6. Lucrare în curs de publicare în volum indexat ISI la Editura Springer

**[17]** D.Robu, **R.Curpen**, D.Ilie, T.Balan - Open Source Online Conference System for Industry Experts Participation in Education - Proceedings of the 13th International Conference on Interactive Mobile Communication Technologies and Learning, Oct.31- Nov.01, 2019, Thessaloniki, GR - ISBN 978-3-030-49931-0 - <https://www.springer.com/gp/book/9783030499310>

## 8. Bibliografie

- [1] D. Astély *et al.*, "LTE: The Evolution of Mobile Broadband," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 4, Apr. 2009.
- [2] E. Dahlman *et al.*, *3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband*, 2nd ed., Academic Press, 2008.
- [3] 3GPP TR 36.912, "Feasibility Study for Further Advancements of E-UTRA (LTE-Advanced)"
- [4] ITU-R M.2134, "Requirements Related to Technical Performance for IMT-Advanced Radio Interface(s)"; [http://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REPM.2134-2008-PDF-E.pdf](http://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REPM.2134-2008-PDF-E.pdf) (accesat în aprilie 2020)
- [5] Stefan Parkvall, Anders Furuskär, Erik Dahlman, „Evolution of LTE toward IMT-Advanced”, IEEE Communications Magazine (Vol: 49, Issue: 2, February 2011), DOI: 10.1109/MCOM.2011.5706315
- [6] Antenna Diversity <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/antenna-diversity> (accesat în aprilie 2020)
- [7] Qinghua Li, Guangjie Li, Wookbong Lee, Moon-il Lee, David Mazzaresse, Bruno Clerckx, Zexian Li , „MIMO techniques in WiMAX and LTE: a feature overview”, IEEE Communications Magazine (Vol: 48, Issue: 5, May 2010) DOI: 10.1109/MCOM.2010.5458368
- [8] Shannon Equation [https://www.st-andrews.ac.uk/~www\\_pa/Scots\\_Guide/iandm/part8/page1.html](https://www.st-andrews.ac.uk/~www_pa/Scots_Guide/iandm/part8/page1.html) (accesat în aprilie 2020)
- [9] L. Dumitriu and M. Iordache „Generation of the Transfer Functions for MIMO Systems”, Third International Conference on Modern Power Systems MPS 2010, 18-21 May 2010, Cluj-Napoca, Romania
- [10] Stefan Parkvall, Eva Englund, Anders Furuskär, Erik Dahlman, Tomas Jönsson, Anthony Paravati "LTE Evolution towards IMT-Advanced and Commercial Network Performance", IEEE International Conference on Communication Systems, 17-19 Nov. 2010, DOI: 10.1109/ICCS.2010.5686370
- [11] Cheng-Pang Chien, Kai-Min Yang, Hung-Yun Hsieh, „Selection of transmission points for delay minimization in LTE-A heterogeneous networks with low-power RRHs”, IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 7-10 April 2013, DOI: 10.1109/WCNC.2013.6554663
- [12] Shanzhi Chen, Shaohui Sun, Qiubin Gao, Xin Su, "Performance of LTE Release8 and Release 10 in wireless communications", Proceedings Title: 2012 International Conference on Cyber Security, Cyber Warfare and Digital Forensic (CyberSec), 26-28 June 2012, DOI: 10.1109/CyberSec.2012.6246127
- [13] Yassin, M., AboulHassan, M.A., Lahoud, S. et al. „Survey of ICIC techniques in LTE networks under various mobile environment parameters”, *Wireless Netw* 23, 403–418 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11276-015-1165-z> (accesat în aprilie 2020)
- [14] 3GPP Release 11: Understanding the Standards for HSPA+ and LTE-Advanced Enhancements [https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2019/07/3GPP\\_Release\\_11-ES\\_Final.pdf](https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2019/07/3GPP_Release_11-ES_Final.pdf) (accesat în aprilie 2020)
- [15] Yuan Huiyu, Zheng Naizheng, Yan Yuyu, Peter Skov, "Performance evaluation of coordinated multipoint reception in CRAN under LTE-Advanced uplink", 7th International Conference on Communications and Networking in China, 8-10 Aug. 2012, DOI: 10.1109/ChinaCom.2012.6417589
- [16] Wan Chen, Ishtiaq Ahmad, KyungHi Chang, „Co-channel interference management using eICIC/FeICIC with coordinated scheduling for the coexistence of PS-LTE and LTE-R networks”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2017
- [17] Xiaogang Chen, Yuan Zhu, Qinghua Li, „Enhanced Physical Downlink Control Channel” <https://patents.google.com/patent/US9226278B2/en> (accesat în aprilie 2020)
- [18] David Lecompte, Frederic Gabin, „Evolved multimedia broadcast/multicast service (eMBMS) in LTE-advanced: overview and Rel-11 enhancements”, *IEEE Communications Magazine*, November 2012, vol.50, issue 11

- [19] Seppo Hamalainen, Henning Sanneck, Cinzia Sartori „LTE Self-Organising Networks (SON): Network Management Automation for Operational Efficiency”, January 2012, ISBN: 978-1-119-97067-5, pg. 65-68, 118, 157-160, 193, 204, 219, 334
- [20] Ming Fei, Pingzhi Fan „Position-assisted fast *handover* schemes for LTE-*advanced* network under high mobility scenarios”, Journal of Modern Transportation no.20, 268-273(2012)
- [21] TS 23.682 Architecture enhancements to facilitate communications with packet data networks and applications  
<https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=862>  
 (accesat în aprilie 2020)
- [23] Nicholas Herriot, Ashley Mills, David Lister, "Telecommunications system and method", Feb 2016, <https://patents.google.com/patent/US20140146826> (accesat în aprilie 2020)
- [24] Fengjun Xi, Lujing Cai, Joseph S. Levy, Benoit Pelletier, Hong O. Zhang, „Managing control signaling overhead for multi-carrier HSDPA”, <https://patents.google.com/patent/US9407404B2/en> (accesat în aprilie 2020)
- [25] Thirumalai Padmapriya, Vaitilingam Saminadan, „Improving throughput for *downlink* multi user MIMO-LTE *advanced* networks using SINR approximation and hierarchical CSI feedback”, International Journal of Mobile Network Design and Innovation, 13 May 2015, Print ISSN: 1744-2869 Online ISSN: 1744-2850
- [26] Md. Abbas Ali, Alcardo Alex Barakabitze, „Evolution of LTE and Related Technologies towards IMT-*Advanced*”, International Journal of *Advanced* Research in Computer Science and *Software* Engineering, Jan 2015, vol.5, Issue 1, ISSN:2277 128X
- [27] Arnaud Vadrine, Saso Stojanovski, „Device and method for performing a reverse single radio voice call continuity (RSRVC) procedure”, March 2015, <https://patents.google.com/patent/US8971875B2/en> (accesat în aprilie 2020)
- [28] Enhancements for Multimedia Priority Service (MPS) TR 23.854  
<https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=934>  
 (accesat în aprilie 2020)
- [29] Haris Zisimopoulos, Vaishali Paisal, „Method and system for *handover* of video calls from a packet switched network to a circuit switched network in a single radio environment” March 2013, <https://patents.google.com/patent/US20130063540A1/en> (accesat în aprilie 2020)
- [30] Tewfik Doumi, Mike F. Dolan, Said Tatesh, Alessio Casati, George Tsirtsis, Kiran Anchan, Dino Flore, „LTE for public safety networks”, IEEE Communications Magazine (Vol: 51, Issue: 2, Feb 2013), DOI: 10.1109/MCOM.2013.6461193
- [31] Yung-Lan Tseng, „LTE-*Advanced* enhancement for vehicular communication”, IEEE Wireless Communications (Vol:22, Issue:6 , Dec. 2015), DOI: 10.1109/MWC.2015.7368815
- [32] Amedeo Imbimbo, Alessandro Mordacci, Giuseppe Amato, „Lawful interception in an IP multimedia subsystem network”, May 2015, <https://patents.google.com/patent/US9026645B2/en> (accesat în aprilie 2020)
- [33] Rapeepat Ratasuk, Dominic Tolle, Amitava Ghosh, „Carrier Aggregation in LTE-*Advanced*”, 2010 IEEE 71st Vehicular Technology Conference, 24 June 2010, DOI: 10.1109/VETECS.2010.5493902
- [34] Ericsson Mobile Data Traffic press release <https://www.ericsson.com/en/press-Releases/2011/11/ericsson-predicts-mobile-data-traffic-to-grow-10-fold-by-2016> (accesat în aprilie 2020)
- [35] N. Wood, " *Upload*Traffic Starting to top *Download*Traffic on EE Network", 2013

- [36] TS 23.261 IP flow mobility and seamless Wireless Local Area Network (WLAN) offload [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/123200\\_123299/123261/10.01.00\\_60/ts\\_123261v100100p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/123200_123299/123261/10.01.00_60/ts_123261v100100p.pdf) (accesat în aprilie 2020)
- [37] C.B. Sankaran, „Data offloading techniques in 3GPP Rel-10 networks: A tutorial”, IEEE Communications Magazine (Vol:50, Issue:6, June 2012), DOI: 10.1109/MCOM.2012.6211485
- [38] 3GPP TR 22.934 *Feasibility study on 3GPP system to Wireless Local Area Network (WLAN) interworking*, [https://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/STD-T63v9\\_10/5\\_Appendix/Rel8/22/22934-800.pdf](https://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/STD-T63v9_10/5_Appendix/Rel8/22/22934-800.pdf) (accesat în aprilie 2020)
- [39] 3GPP TS 23.402 *Architecture enhancements for non-3GPP accesses*, <https://www.tech-invite.com/3m23/tinv-3gpp-23-402.html> (accesat în aprilie 2020)
- [40] 3GPP TS 33.402 *3GPP System Architecture Evolution (SAE); Security aspects of non-3GPP accesses*, [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/133400\\_133499/133402/11.04.00\\_60/ts\\_133402v110400p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/133400_133499/133402/11.04.00_60/ts_133402v110400p.pdf) (accesat în aprilie 2020)
- [41] LTE frequency bands [https://en.wikipedia.org/wiki/LTE\\_frequency\\_bands](https://en.wikipedia.org/wiki/LTE_frequency_bands) (accesat în aprilie 2020)
- [42] LTE OFDM, OFDMA SC-FDMA & Modulation <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/4g-lte-long-term-evolution/ofdm-ofdma-scdma-modulation.php> (accesat în aprilie 2020)
- [43] TS 23.002 Network architecture <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=728> (accesat în aprilie 2020)
- [44] 3GPP The Evolved Packet Core <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/100-the-evolved-packet-core> (accesat în aprilie 2020)
- [45] TS 23.251 Group Services and System Aspects; Network Sharing; Architecture and functional description [https://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/STD-T63V9\\_21/5\\_Appendix/Rel10/23/23251-a20.pdf](https://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/STD-T63V9_21/5_Appendix/Rel10/23/23251-a20.pdf) (accesat în aprilie 2020)
- [46] TS 36.413 Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); S1 Application Protocol (S1AP) <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2446> (accesat în aprilie 2020)
- [47] TS 36.423 Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); X2 Application Protocol (X2AP) <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2452> (accesat în aprilie 2020)
- [48] Saxena, Ankit. (2015). Mobile Interface 3GPP Interfaces description General map SAE/LTE map. 10.13140/2.1.4555.3447 [https://www.researchgate.net/publication/271719804\\_Mobile\\_Interface\\_3GPP\\_Interfaces\\_description\\_General\\_map\\_SAE\\_LTE\\_map](https://www.researchgate.net/publication/271719804_Mobile_Interface_3GPP_Interfaces_description_General_map_SAE_LTE_map) (accesat în aprilie 2020)
- [49] RFC 6733 Diameter Base Protocol <https://datatracker.ietf.org/doc/rfc6733/> (accesat în aprilie 2020)
- [50] <https://datatracker.ietf.org/doc/rfc4960/> (accesat în aprilie 2020)
- [51] Penttinen, J. T. (Ed.). (2016). *The LTE-advanced deployment handbook: the planning guidelines for the fourth generation networks*. John Wiley & Sons. [http://dl.booktolearn.com/ebooks2/engineering/telecommunications/9781118484807\\_the\\_lte-advanced\\_deployment\\_handbook\\_4a85.pdf](http://dl.booktolearn.com/ebooks2/engineering/telecommunications/9781118484807_the_lte-advanced_deployment_handbook_4a85.pdf) (accesat în aprilie 2020)
- [60] Altrad, O., Muhaidat, S., Yamanaka, N., Takeshita, H., Tokuhashi, K., Sato, T., ... & Schwaiger, S. (2013). Load balancing based on clustering methods for LTE networks. *J. Sel. Areas in Telecommun.(JSAT)*, 8, 9.

- [61] Yamamoto, T., Komine, T., & Konishi, S. (2012). Mobility load balancing scheme based on cell reselection. *Cell*, 7, 7UEs.
- [62] Yang, Q. P., Kim, J. W., & Kim, T. H. (2012). Mobility prediction and load balancing based adaptive handovers for LTE systems. *International Journal on Computer Science and Engineering*, 4(4), 638.
- [63] Rodriguez, J., De la Bandera, I., Munoz, P., & Barco, R. (2011, May). Load balancing in a realistic urban scenario for LTE networks. In *2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)* (pp. 1-5). IEEE.
- [64] Jorgensen, N. T. K., Laselva, D., & Wigard, J. (2011, May). On the potentials of traffic steering techniques between HSDPA and LTE. In *2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)* (pp. 1-5). IEEE.
- [65] Mishra, S., & Mathur, N. (2014). Load balancing optimization in LTE/LTE-A cellular networks: a review. *arXiv preprint arXiv:1412.7273*.
- [66] LTE Metrics including RSRP, RSRQ and SINR <https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/4glte/lte-rsrq-sinr/> (accesat în aprilie 2020)
- [67] Schwartz, M. (1987). *Telecommunication networks: protocols, modeling and analysis* (Vol. 7). Reading, MA: Addison-Wesley.
- [68] Florescu, I. (2014). *Probability and stochastic processes*. John Wiley & Sons.
- [69] Okumura, Y. (1968). Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile radio service. *Rev. Electr. Commun. Lab.*, 16, 825-873.
- [70] Kingman, J. F. C. (2005). Poisson processes. *Encyclopedia of biostatistics*, 6.
- [71] S. Qazi, A. S. Siddiqui and A. I. Wagan, "UAV based real time video surveillance over 4G LTE", 2015 International Conference on Open Source Systems & Technologies (ICOSST), Lahore, 2015, pp. 141-145.
- [72] Sky Drone FPV2: <https://www.skydrone.aero/products/sky-drone-fpv> (accesat în aprilie 2020)
- [73] Qualcomm Technologies, Inc., LTE Unmanned Aircraft Systems, Trial Report, v1.0.1, May 12, 2017, available at: <https://www.qualcomm.com/documents/lte-unmanned-aircraft-systems-trial-report>
- [74] Jover, R.P., Lackey, J. & Raghavan, "Enhancing the security of LTE networks against jamming attacks", A. EURASIP J. on Info. Security, 2014
- [75] T. Multerer et al., "Low-cost jamming system against small drones using a 3D MIMO radar based tracking," 2017 European Radar Conference (EURAD), Nuremberg, 2017, pp. 299-302.
- [76] X. Lin, V. Yajnanarayana, S. D. Muruganathan, S. Gao, H. Asplund, H.-L. Maattanen, M. Bergström A, S. Euler, Y.-P. E. Wang, "The sky is not the limit: LTE for unmanned aerial vehicles," IEEE Communications Magazine, July 2017
- [77] L. M. Schalk and M. Herrmann, "Suitability of LTE for drone-to-infrastructure communications in very low level airspace," 2017 IEEE/AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference (DASC), St. Petersburg, FL, 2017, pp. 1-7.
- [78] NTT DOCOMO, RP-170779, "Study on enhanced LTE support for aerial vehicles", Ericsson, March 2017
- [79] Antenna Patterns and Their Meaning [https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-antennas-accessories/prod\\_white\\_paper0900aecd806a1a3e.html](https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-antennas-accessories/prod_white_paper0900aecd806a1a3e.html) (accesat în aprilie 2020)
- [80] Y400 NetTek Platform Characteristics available online at: [https://www.aaatesters.com/tektronix\\_y400\\_ybt250\\_yba250\\_specifications\\_spec\\_sheet](https://www.aaatesters.com/tektronix_y400_ybt250_yba250_specifications_spec_sheet) (accesat în aprilie 2020)
- [81] Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Access to the 3GPP Evolved Packet Core (EPC) via non-3GPP access networks; Stage 3 [www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/136100\\_136199/136101/.../ts\\_136101v110200p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136100_136199/136101/.../ts_136101v110200p.pdf) (accesat în aprilie 2020)
- [82] Software Radio Systems (SRS) <https://www.srslte.com> (accesat în aprilie 2020)

- [83] SDRF. Base Station System Structure [http://www.sdrforum.org/pages/documentLibrary/documents/SDRF-01-P-0006-V2\\_0\\_0\\_BaseStation\\_Systems.pdf](http://www.sdrforum.org/pages/documentLibrary/documents/SDRF-01-P-0006-V2_0_0_BaseStation_Systems.pdf) (accesat în aprilie 2020)
- [84] Wireless Innovation. Software Defined Radio <https://www.wirelessinnovation.org/assets/documents/SoftwareDefinedRadio.pdf> (accesat în aprilie 2020)
- [85] SDRF Cognitive Radio Definitions [http://www.sdrforum.org/pages/documentLibrary/documents/SDRF-06-R-0011-V1\\_0\\_0.pdf](http://www.sdrforum.org/pages/documentLibrary/documents/SDRF-06-R-0011-V1_0_0.pdf) (accesat în aprilie 2020)
- [86] Network Function Virtualization <https://www.ciena.com/insights/articles/What-is-NFV-prx.html> (accesat în aprilie 2020)
- [87] Dynamic Networks: SDN and NFV <https://vividcomm.com/2017/06/01/dynamic-networks-sdn-and-nfv/> (accesat în aprilie 2020)
- [88] Iyer, S. (2014). Virtualisation of Network Functions and the SDN. *Australian Journal of Telecommunications and the Digital Economy*, 2(2).
- [89] Abbas Bradai, Tinku Rasheed, Toufik Ahmed, Kamal Singh, 02 December 2015, Cellular Software Defined Network – a Framework; [https://www.researchgate.net/publication/273380717\\_Cellular\\_Software\\_Defined\\_Network\\_-\\_a\\_Framework](https://www.researchgate.net/publication/273380717_Cellular_Software_Defined_Network_-_a_Framework) (accesat în aprilie 2020)
- [90] Tarik Taleb, "Towards Carrier Cloud: Potential, Challenges, & Solutions," *IEEE Wireless Communications*, vol. 21, numar 3, Iunie 2014. pag. 80–91
- [91] Nooelec NESDR Mini 2 SDR & DVB-T USB Stic <https://www.nooelec.com/store/sdr/sdr-receivers/nesdr-mini2-rtl2832u-r820t2.html> (accesat în aprilie 2020)
- [92] Nooelec NESDR Nano 2+ Tiny RTL-SDR USB Set <https://www.nooelec.com/store/nesdr-nano2-plus.html> (accesat în aprilie 2020)
- [93] HackRF <https://greatscottgadgets.com/hackrf/> (accesat în aprilie 2020)
- [94] USRP B210 Bus Series [https://www.ettus.com/wp-content/uploads/2019/01/b200-b210\\_spec\\_sheet.pdf](https://www.ettus.com/wp-content/uploads/2019/01/b200-b210_spec_sheet.pdf) (accesat în aprilie 2020)
- [95] GNU RadioCore Concepts <https://wiki.gnuradio.org/index.php/TutorialsCoreConcepts> (accesat în aprilie 2020)
- [96] „OpenLTE – An open source 3GPP LTE implementation” <https://sourceforge.net/p/openlte/wiki/Home/> (accesat în aprilie 2020)
- [97] Gomez-Miguel, A. Garcia-Saavedra, P.D. Sutton, P. Serrano, C. Cano, and D.J. Leith, „srsLTE: An Open-Source Platform for LTE Evolution and Experimentation”, *arXiv preprint arXiv:1602.04629, 2016.*
- [98] „gr-LTE – Gnuradio LTE cellular receiver.” <https://github.com/kit-cel/gr-lte> (accesat în aprilie 2020)
- [99] LabVIEW 2020 Features <https://www.ni.com/ro-ro/shop/labview/labview-details.html> (accesat în aprilie 2020)
- [100] Gomez-Miguel, I., Garcia-Saavedra, A., Sutton, P. D., Serrano, P., Cano, C., & Leith, D. J. (2016, October). srsLTE: an open-source platform for LTE evolution and experimentation. In *Proceedings of the Tenth ACM International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation, and Characterization* (pp. 25-32)
- [101] SRS EPC User Manual [https://docs.srslte.com/en/latest/srsepc/source/1\\_epc\\_intro.html#overview](https://docs.srslte.com/en/latest/srsepc/source/1_epc_intro.html#overview) (accesat în aprilie 2020)
- [102] TS 33.102. 3G security; Security architecture [https://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/STD-T63v9\\_10/5\\_Appendix/Rel5/33/33102-570.pdf#page=60&zoom=100,76,110](https://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/STD-T63v9_10/5_Appendix/Rel5/33/33102-570.pdf#page=60&zoom=100,76,110) (accesat în aprilie 2020)
- [103] TS 33.103. Group Services and System Aspects; 3G security [https://www.3gpp.org/ftp/tsg\\_sa/WG3\\_Security/Specs/33103-420.pdf](https://www.3gpp.org/ftp/tsg_sa/WG3_Security/Specs/33103-420.pdf) (accesat în aprilie 2020)

- [104] TS 23.203. Policy and charging control architecture  
[https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/123200\\_123299/123203/12.06.00\\_60/ts\\_123203v120600p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/123200_123299/123203/12.06.00_60/ts_123203v120600p.pdf), pag. 16 (accesat în aprilie 2020)
- [105] Diameter Protocol Explained <https://diameter-protocol.blogspot.com/2013/06/usage-of-opopc-and-transport-key.html> (accesat în aprilie 2020)
- [106] Radio Network Temporary Identifier <http://howltestuffworks.blogspot.com/2014/06/rntis-in-lte.html> (accesat în aprilie 2020)
- [107] Non Access Stratum Procedure <https://lteqa.blogspot.com/2015/09/nas-procedure.html> (accesat în aprilie 2020)
- [108] Jiang, D., Wang, H., Malkamaki, E., & Tuomaala, E. (2007, September). Principle and performance of semi-persistent scheduling for VoIP in LTE system. In *2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing* (pp. 2861-2864). IEEE.
- [109] Choi, S., Jun, K., Shin, Y., Kang, S., & Choi, B. (2007, October). MAC scheduling scheme for VoIP traffic service in 3G LTE. In *2007 IEEE 66th Vehicular Technology Conference* (pp. 1441-1445). IEEE.,
- [110] Mushtaq, M. S., Shahid, A., & Fowler, S. (2012, December). Qos-aware lte *downlink* scheduler for voip with power saving. In *2012 IEEE 15th International Conference on Computational Science and Engineering* (pp. 243-250). IEEE.
- [111] Asheralieva, A., Khan, J. Y., & Mahata, K. (2011, November). Performance analysis of voip services on the lte network. In *2011 Australasian Telecommunication Networks and Applications Conference (ATNAC)* (pp. 1-6). IEEE.
- [112] Zhang, X. (2018). *LTE Optimization Engineering Handbook*. John Wiley & Sons. pp140-152
- [113] Dahlman, E., Parkvall, S., Skold, J., & Beming, P. (2010). *3G evolution: HSPA and LTE for mobile broadband*. Academic press.
- [114] Full Modulation Coding Scheme Table <http://mcsindex.com/> (accesat în aprilie 2020)
- [115] Yonis, A. Z., Abdullah, M. F. L., & Ghanim, M. F. (2012). LTE-FDD and LTE-TDD for cellular communications. *Proceeding, Progress in*.
- [116] Kawser, M. T., Hamid, N. I. B., Hasan, M. N., Alam, M. S., & Rahman, M. M. (2012). Limiting HARQ Retransmissions in *Downlink* for PoorRadio Link in LTE. *International Journal of Information and Electronics Engineering*, 2(5), 707.
- [117] Aljburi, Dalya. (2016). Adaptive modulation and coding (AMC). 10.13140/RG.2.1.1557.9127. [https://www.researchgate.net/publication/305444834\\_Adaptive\\_modulation\\_and\\_coding\\_AMC](https://www.researchgate.net/publication/305444834_Adaptive_modulation_and_coding_AMC) (accesat în aprilie 2020)
- [118] Jiang, D., Wang, H., Malkamaki, E., & Tuomaala, E. (2007, September). Principle and performance of semi-persistent scheduling for VoIP in LTE system. In *2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing* (pp. 2861-2864). IEEE.
- [119] Agarwal, Y., Chandra, R., Wolman, A., Bahl, P., Chin, K., & Gupta, R. (2007, June). Wireless wakeups revisited: energy management for voip over wi-fi smartphones. In *Proceedings of the 5th international conference on Mobile systems, applications and services* (pp. 179-191)
- [120] Voice Over IP - Per Call Bandwidth Consumption  
<https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/voice/voice-quality/7934-bwidth-consume.html> (accesat în aprilie 2020)
- [121] Rec. ITU-R M.1225 1 GUIDELINES FOR EVALUATION OF RADIO TRANSMISSION TECHNOLOGIES FOR IMT-2000 [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1225-0-199702-!!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1225-0-199702-!!!PDF-E.pdf) (accesat în aprilie 2020)
- [122] Mühleisen, M., Timm-Giel, A., & Walke, B. (2016). IMT-advanced compliant LTE *uplink* VoIP capacity evaluation under soft frequency reuse. *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 13(1), 32-42.

- [123] Vieira, P., Queluz, P., & Rodrigues, A. (2008, December). LTE spectral efficiency using spatial multiplexing MIMO for macro-cells. In *2008 2nd International Conference on Signal Processing and Communication Systems* (pp. 1-6). IEEE.
- [124] Nyangaresi, V. O., Abeka, S. O., & Arika, R. N. (2018). Low latency automatic repeat request protocol for time sensitive GSM-enabled smart phone video streaming services.
- [125] Wallis, M. B., Gaddam, S. K., & Corcoran, S. (2014). *U.S. Patent No. 8,682,322*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office
- [126] Gavrilović, S. (2010, May). Standard based solutions for voice and SMS services over LTE. In *The 33rd International Convention MIPRO* (pp. 334-339). IEEE.
- [127] Teković, A., Pešut, I., & Morić, Z. (2013, September). Voice service in an LTE network-CSFB. In *Proceedings ELMAR-2013* (pp. 251-254). IEEE.
- [128] Stepaniuk, O. (2010, February). Voice over LTE via Generic Access (VoLGA) as a possible solution of mobile networks transformation. In *2010 International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)* (pp. 205-205). IEEE.
- [129] Security Solution For Voice Over LTE Via GAN (VoLGA)  
<https://patents.google.com/patent/US20110299682A1/en> (accesat în aprilie 2020)
- [130] Sauter, M. (2009). Voice over LTE via Generic Access (VoLGA). *A Whitepaper*, 1-16. (accesat în aprilie 2020)
- [131] Vittal, S. (2011). Single Radio Voice Call Continuity (SRVCC) with LTE. *Radisys White Paper*, 1-10.
- [132] Paisal, V. (2010, December). Seamless voice over LTE. In *2010 IEEE 4th International Conference on Internet Multimedia Services Architecture and Application* (pp. 1-5). IEEE.
- [133] Open IMS Core platform <http://openimscore.sourceforge.net/> (accesat în aprilie 2020)
- [134] Mayer C., Gamer T., Integrating real world applications into OMNeT++, Institute of Telematics, Universität Karlsruhe (TH), TM-2008-2, Feb. 2008, pp. 80-89
- [135] OMNeT++ Discrete Event Simulator <http://www.omnetpp.org/> (accesat în aprilie 2020)
- [136] 4Gsim Application and code <https://github.com/4gsim/4Gsim.git> (accesat în aprilie 2020)
- [137] [H. Holma, A. Toskala, "LTE for UMTS – OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access", John Wiley & Sons Ltd., 2009]
- [138] Ericsson Mobility Report June 2017 <https://www.ericsson.com/assets/local/mobility-report/documents/2017/ericsson-mobility-report-june-2017.pdf> (accesat în aprilie 2020)
- [139] Ericsson Review Magazine Feb. 2013. Delivering content with LTE Broadcast  
<https://www.ericsson.com/49e895/assets/local/reports-papers/ericsson-technology-review/docs/2013/er-lte-broadcast.pdf> (accesat în aprilie 2020)
- [140] Sullivan, G. J., Ohm, J. R., Han, W. J., & Wiegand, T. (2012). Overview of the high efficiency video coding (HEVC) standard. *IEEE Transactions on circuits and systems for video technology*, 22(12), 1649-1668.
- [141] Sodagar, I. (2011). The mpeg-dash standard for multimedia streaming over the internet. *IEEE multimedia*, 18(4), 62-67.
- [142] Singh, S., Oyman, O., Papathanassiou, A., Chatterjee, D., & Andrews, J. G. (2012, June). Video capacity and QoE enhancements over LTE. In *2012 IEEE international conference on communications (ICC)* (pp. 7071-7076). IEEE.
- [143] Wang, D., Soni, R., Chen, P., & Rao, A. (2011, May). Video telephony over *downlink* LTE systems with/without QoS provisioning. In *34th IEEE Sarnoff symposium* (pp. 1-5). IEEE.
- [144] Trestian, R., Vien, Q. T., Shah, P., & Mapp, G. (2015, October). Exploring energy consumption issues for multimedia streaming in LTE HetNet small cells. In *2015 IEEE 40th Conference on Local Computer Networks (LCN)* (pp. 498-501). IEEE.



- [145] LTE Band 3 <https://halberdbastion.com/technology/cellular/4g-lte/lte-frequency-bands/b3-1800-mhz> (accesat în aprilie 2020)
- [146] Rekhi, P. K., Luthra, M., Malik, S., & Atri, R. (2012). Throughput calculation for LTE TDD and FDD systems. *White paper*. (accesat în aprilie 2020)
- [147] Talukdar, A., Mondal, B., Cudak, M., Ghosh, A., & Wang, F. (2010, May). Streaming video capacity comparisons of multi-antenna LTE systems. In *2010 IEEE 71st Vehicular Technology Conference* (pp. 1-5). IEEE.
- [148] Reibman, A. R., & Berger, A. W. (1995). Traffic descriptors for VBR video teleconferencing over ATM networks. *IEEE/ACM transactions on networking*, 3(3), 329-339
- [149] MPEG-4 and H.263 Video Traces for Network Performance Evaluation <http://www.tkn.tu-berlin.de/research/trace/ltvt.html> (accesat în aprilie 2020)
- [150] Richardson, I. E. (2004). *H. 264 and MPEG-4 video compression: video coding for next-generation multimedia*. John Wiley & Sons
- [151] Choudhury, S., & Gibson, J. D. (2007, November). Information transmission over fading channels. In *IEEE GLOBECOM 2007-IEEE Global Telecommunications Conference* (pp. 3316-3321). IEEE.
- [152] Varshney, U., & Jain, R. (2001). Issues in emerging 4G wireless networks. *Computer*, 34(6), 94-96.
- [153] Ramiro, J., & Hamied, K. (Eds.). (2011). *Self-organizing networks: self-planning, self-optimization and self-healing for GSM, UMTS and LTE*. John Wiley & Sons.
- [154] Peer to peer Definition <https://techterms.com/definition/p2p> (accesat în aprilie 2020)
- [155] NGMN Recommendation on SON and O&M Requirements <https://www.ngmn.org/publications/ngmn-recommendation-on-son-and-om-requirements.html> (accesat în aprilie 2020)
- [156] Mueller, C. M., Bakker, H., & Ewe, L. (2011, May). Evaluation of the automatic neighbor relation function in a dense urban scenario. In *2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)* (pp. 1-5). IEEE.
- [157] Ramiro, J., & Hamied, K. (Eds.). (2011). *Self-organizing networks: self-planning, self-optimization and self-healing for GSM, UMTS and LTE*. John Wiley & Sons.
- [158] Østerbø, O., & Grøndalen, O. (2012). Benefits of self-organizing networks (SON) for mobile operators. *Journal of Computer Networks and Communications*, 2012.
- [159] Lua, E. K., Crowcroft, J., Pias, M., Sharma, R., & Lim, S. (2005). A survey and comparison of peer-to-peer overlay network schemes. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 7(2), 72-93.
- [160] Zu, Q., Hu, B., Gu, N., & Seng, S. (Eds.). (2015). *Human Centered Computing: First International Conference, HCC 2014, Phnom Penh, Cambodia, November 27-29, 2014, Revised Selected Papers* (Vol. 8944, pg 384). Springer.
- [161] Guha, S., & Daswani, N. (2005). *An experimental study of the skype peer-to-peer voip system*. Cornell University.
- [162] Stoica, I., Morris, R., Karger, D., Kaashoek, M. F., & Balakrishnan, H. (2003). Chord. *A scalable peer-to-peer lookup service for Internet applications*, "Proceeding of ACM SIGCOMM, 1..
- [163] Papadakis, H., Trunfio, P., Talia, D., & Fragopoulou, P. (2010). An Experimental Evaluation of the DQ-DHT Algorithm in a Grid Information Service. In *Grids, P2P and Services Computing* (pp. 59-72). Springer, Boston, MA.
- [164] Subramanian, R., & Goodman, B. D. (Eds.). (2005). *Peer-to-peer computing: the evolution of a disruptive technology*. Igi Global. Pp. 35-37
- [165] Castro, M., Druschel, P., Hu, Y. C., & Rowstron, A. (2003). Topology-aware routing in structured peer-to-peer overlay networks. In *Future directions in distributed computing* (pp. 103-107). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [166] Zhang, H. (2012, January). Peer to peer technologies in future LTE self-organizing networks. In *2012 Computing, Communications and Applications Conference* (pp. 127-132). IEEE.

- [167] Ripeanu, M. (2001, August). Peer-to-peer architecture case study: Gnutella network. In *Proceedings first international conference on peer-to-peer computing* (pp. 99-100). IEEE.
- [168] Petrek, J., & Sledt, V. (2001). A large hierarchical network star—star topology design algorithm. *European transactions on telecommunications*, 12(6), 511-522.
- [169] Botswana Mascom Wireless Coverage Map <https://docplayer.net/48871598-lct-literacy-policy-botswana.html> pag. 22 (accesat în aprilie 2020)
- [170] IXIA IxLoad Stateless Peer <https://www.yumpu.com/en/document/read/29536078/stateless-peer-ixia> <http://www-tnk.ee.tu-berlin.de/research/trace/stat.html> accesat în aprilie 2020)

## Rezumat

Contribuțiile propuse în această lucrare pentru o rețea LTE nu acoperă o singură arie a acestei rețele. Dimpotrivă, ele aduc în discuție o gamă variată de optimizări, majoritatea acestora ținând către reducerea riscului de congestie, fie ea congestie a traficului de voce, date, sau a traficului de semnalizare.

Un punct de interes al lucrării de față a fost simplificarea întregii rețele a unui operator. Am analizat subiectul traficului în rețelele LTE din perspectivele eficientizării, evitării congestiei acestuia, dar și al restricționării lui, printr-un studiu de caz asupra dronelor care încearcă să pătrundă într-un spațiu interzis.

O contribuție în acest sens este integrarea unui mediu dedicat pentru ingineria traficului cu valențe RET (*Real Equipment Testing*) și IOT (*Interoperability Testing*), cu control cvasi-complet al nivelelor OSI cu posibilități de emulare și control a încărcării, a congestiei (*load and stress*) a unor scenarii diverse (inclusiv avarii) și chiar bruiaj („*jamming*”).

Meritul acestei abordări este că se face de sus în jos („*top-down*”), deci se face funcțional pornind de la însăși poziția superioară a nivelelor *software* în ierarhia OSI. Un avantaj al acestei „granularități”, a programabilității de detaliu, rezidă în posibilitatea de securizare la nivele joase, printr-o pluralitate de unități *software* orizontale care completează straturile *software* verticale.

## Abstract (english)

The proposed contributions of this paper for an LTE network do not cover a single area of this network. On the contrary, they bring into question a wide range of optimizations, most of which are aimed at reducing the congestion risks, be them of voice, data, or signaling traffic.

One point of interest in this paper was the simplification of an operator's entire network. I analyzed the subject of traffic in LTE networks from the perspectives of efficiency, congestion avoidance, but also restricting it, on a drone entering a forbidden space case study.

A contribution in this regard is the integration of a dedicated environment for traffic engineering with RET (Real Equipment Testing) and IoT (Interoperability Testing) traits, and OSI levels partial control with possibilities for emulation and control of loading and congestion (load and stress) of various scenarios (network faults) and even jamming.

The merit of this approach is that it is functionally done "top-down", starting from the very top position of the OSI software levels. An advantage of this "granularity", of the detailed programmability, lies in the possibility of low level security, through a plurality of horizontal software units that complement the vertical software layers.