



REȚELE ETEROGENE ÎN LTE

Rezumat

Ing. PETRUȚ Ionel Romeo

Coordonator: Prof. dr. ing. OTEȘTEANU MARIUS

1. Introducere

Astăzi este greu să ne imaginăm o lume fără conectivitate, fără acces la diversele servicii online, de la voce la filme cu rezoluție 4K, de la navigarea pe Internet până la live chat. Capabilitatea de conectivitate devine mai puternică în asociere cu mobilitatea în acel moment în care: locația, viteza de deplasare și tehnologia de acces conlucrează în asigurarea unei experiențe online aparte. Astăzi totul se dezvoltă rapid, noi tehnologii se nasc în fiecare zi, dar în același ritm, cresc așteptările utilizatorilor.

Tehnologia care a făcut posibilă apariția telefoanelor mobile a fost dezvoltată pentru prima oară în anii 1940, dar până la mijlocul anilor 1980 nu a devenit disponibilă pe scară largă. Din anii 1980, procesele de dezvoltare au trecut prin mai multe faze și rețelele mobile au evoluat de la o generație la alta, fiecare nouă generație venind cu performanțe mai bune, acoperire mai mare și capacitate îmbunătățită de transfer, continuând să crească experiența utilizatorilor finali în paralel cu eficientizarea costului de producere și exploatare[1]. Furnizorii de rețele mobile depun eforturi considerabile pentru a adapta infrastructura existentă pentru a satisface noile cerințe și a combina noile tehnologii cu tehnologiile vechi în modelarea viitoarelor rețele de comunicații mobile. Luând în considerare toate aceste aspecte, se impune evoluția de la o rețea cu un singur strat / tehnologie la o rețea eterogena multistrat / multi-tehnologie.

1.1 Problematika subiectului

Conform statisticilor realizate de “World Cellular Information Service (WCIS)”, în 2016 mai mult de 75% din apelurile telefonice realizate în rețelele de telefonie mobile au fost efectuate în interiorul clădirilor[2]. Tendința de creștere a consumului de putere în interiorul clădirilor a determinat acțiuni din partea agențiilor guvernamentale din numeroase țări în vederea limitării puterii maxime admise pentru stațiile de emisie localizate în interiorul clădirilor, pentru a reduce impactul negativ al undelor electromagnetice asupra corpului uman[3].

În prezent, traficul de date din rețelele mobile este în creștere, iar așteptările privind performanțele abonaților sunt de asemenea în creștere, astfel încât suplimentarea rețelelor macro existente cu celule mici este o modalitate eficientă de a oferi o acoperire mai bună și o capacitate mai mare de transfer atât în mediul interior cât și în zona exterioară.

Celulele mici sunt stații de bază cu cost redus, cu putere redusă, concepute pentru a îmbunătăți acoperirea și capacitatea rețelelor mobile. Prin implementarea celulelor mici în completarea rețelelor tradiționale macro-celulare, operatorii se află într-o poziție mult mai bună de a oferi utilizatorilor finali o mai uniformă și mai bună calitate a serviciului (Quality of Experience - QoE) [4]. Luând în considerare toate provocările care vin cu cerința de conectivitate permanentă, se impune evoluția de la o rețea la o rețea eterogenă, multi-straturi / multi-tehnologie. Rețelele eterogene pot combina celule cu dimensiuni diferite cu tehnologii de access diferite în cadrul aceluiași system.

Odată ce combinați celulele montate în interior cu cele locat în exterior trebuie să avem grijă de anumite particularități cum ar fi: o gamă diferită de putere de transmisie, capacitate de procesare diferită și interferențe specifice.

1.2 Obiectivele tezei

Principalul obiectiv al tezei este acela de a aduce contribuții noi și relevante în domeniul rețelelor LTE eterogene. The main goal of this thesis is to bring new and relevant contributions in the area of LTE Heterogeneous Networks. Contribuția prezentată în această lucrare corespunde mai multor direcții de cercetare diferite care vor fi descrise mai jos.

Studiul performanței în interiorul clădirii și fezabilitatea celulelor LTE mici cu capacități de beamforming a fost primul produs al cercetării mele. După primele rezultate încurajatoare, am continuat să explorăm subiectul descoperind diferite moduri de a îmbunătăți acoperirea cu semnal LTE în interiorul cladirilor folosind și capacitățile MIMO ale celulelor mici.

Următorul subiect principal a fost analiza performanței HetNet și studiile de îmbunătățire a performanței pe mai multe direcții:

- Optimizarea mecanismului de transfer prin înlocuirea indicatorului de intensitate a semnalului - RSRP cu indicatorul de calitate a semnalului - RSRQ ca și declanșator în mecanismul de handover.
- Îmbunătățirea capacității de transfer total pe cale ascendentă prin efectuarea unei densificări a rețelei utilizând celule mici
- Reducerea efectelor interferențelor și creșterea capacității clusterului prin tehnologia eICIC în rețelele HetNet.

Al treilea subiect abordat a fost analiza experienței utilizatorilor finali în rețelele mobile și determinarea influențelor rețelelor mobile asupra corpului uman (am analizat impactul radiației electromagnetice, SAR - rata de absorbție specifică).

2. Context și motivație

Astăzi trăim vremuri în care comunicarea este esențială, și accesul la internet atât pentru oameni, pentru calculatoare cât și pentru obiecte inteligente trebuie asigurat de operatorii de telefonie oriunde, oricând. Totul se dezvoltă rapid: tehnologiile noi se nasc zilnic, echipamentele de utilizator sunt din ce în ce mai performante, iar utilizatorii cer în mod constant un trafic de date mai mare și o performanță mai bună a rețelei. De la introducerea primei rețele mobile și până în prezent, rețelele mobile au evoluat spre performanțe mai bune, o acoperire mai bună cu semnal, o capacitate de transfer mai mare, o capacitate mai mare pentru fiecare utilizator. Aceste nevoi au condus la dezvoltarea unei arhitecturi minimaliste, ușor de implementat și rentabilă din punct de vedere financiar [5].

LTE folosește Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) ca și tehnologie de access radio împreună tehnici avansate de antene, cum ar fi Multiple-Input-Multiple-Output (MIMO), multiplexarea spațială și capabilități de beam-forming. Alegerea tehnologiei OFDM nu numai că ajută LTE să îndeplinească cerințele privind flexibilitatea spectrului, ci și oferă soluții eficiente din punct de vedere al costurilor prin utilizarea eficientă a resurselor radio.

2.1 Rețele eterogene - Heterogeneous networks (HetNet)

Utilizarea dispozitivelor mobile a crescut în mod exponențial în ultimii ani. Creșterea exponențială a utilizării dispozitivelor mobile interconectate va duce la creșterea proporțională a traficului de date [6]. Deoarece există foarte mulți utilizatori care solicită capacitate mare de transfer, problema cu care se confruntă în prezent operatorii de rețele nu este acoperirea teritorială cu semnal, ceea ce este acum destul de bună, ci nevoia de creștere a capacității rețelei [7].

Rețelele Eterogene (HetNet) sunt considerate ca fiind cea mai promițătoare abordare pentru a crește capacitatea rețelei, creșterea capacității de transmitere a datelor, a performanței globale a rețelei precum și pentru a crește acoperirea cu semnal într-un mod rentabil [8]. O rețea HetNet constă în celule clasice de tip macro care transmit în mod obișnuit cu un nivel ridicat de putere, suprapuse cu celule mici de putere redusă cum ar fi celula pico, celula femto, celula de metro, etc. Încorporarea unor astfel de celule mici permite descărcarea traficului din celula macro și oferind o experiență de rețea mai bună prin conectarea UE la celule mici cu putere de transmisie scăzută.

Din această suprapunere a celulelor macro și a celulelor mici în cadrul aceleiași rețele, rezultă o interferență severă între celule vecine, în special pentru utilizatorii conectați la celulele mici, aflați la marginea de acoperire a acestora [8].

Sunt utilizate în prezent diferite tipuri de scenarii de implementare pentru HetNet. În implementarea multicarrier, celulele mici utilizează frecvență purtătoare diferită față de celula macro. Acest proces reduce efectiv ICI, dar nu asigură o utilizare spectrală adecvată. Pe de altă parte, utilizarea co-canal este implementată prin utilizarea aceleiași purtătoare, atât pentru celula macro, cât și pentru celula mică, caz în care eficiența spectrală este mărită prin reutilizarea spațială, aceasta din urmă fiind cea mai utilizată implementare în rețele de tip HetNet. Deși abordarea în co-canal asigură o utilizare eficientă a spectrului, are și un efect negativ prin creșterea semnificativă a interferenței inter-purtătoare, între celulele macro și celulele mici [9].

În figura de mai jos este prezentată o arhitectură generică HetNet, unde sunt incluse principalele tipuri de cellule mici [10].

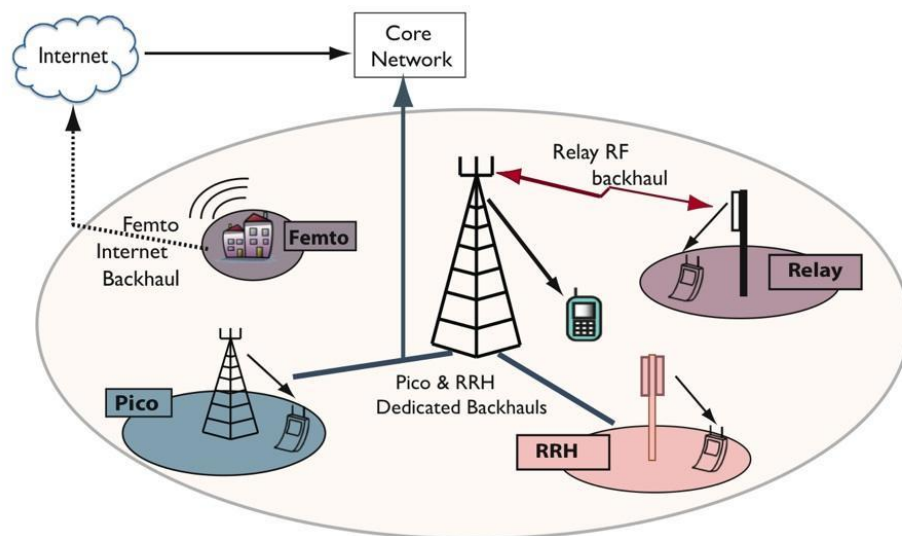


Figure 1: Arhitectura HetNet tipică

3. Performanțele și fezabilitatea utilizării celulelor mici pentru acoperirea cu semnal a clădirilor

Implementarea celulelor mici este influențată de cerințele de furnizare a serviciilor, precum și de constrângerile reale specifice ariilor geografice vizate. Pentru o bună uniformitate a serviciilor, în zonele populate în care prezența clădirilor este principala cauză a atenuării semnalului radio, este posibil ca celulele mici să fie foarte apropiate, de ex. în câteva sute de metri unul de celălalt. În mod natural, performanța celulelor mici este în mare măsură dependentă de caracteristicile specifice mediului, cum ar fi materialele utilizate pentru construcția clădirilor, proprietățile lor specifice de propagare și împrejurimile. Este deosebit de important să se caracterizeze în mod corespunzător un mediu în care sunt instalate celule mici. [4].

Framework-ul dezvoltat de noi utilizează aplicația de predicție WiSE ce are la bază mecanismul de „ray tracing” [11] pentru modelarea 3D a mediului unde realizăm măsurătorile. În special, acest framework poate determina niveluri detaliate de performanță sau caracteristici ale canalelor în orice punct de interes din cadrul unei clădiri și permite testarea scenariilor rapid și ușor. Acesta poate fi folosit pentru a crea reguli de proiectare a rețelelor eterogene și poate fi aplicat la implementarea pe scară largă a celulelor mici.

3.1 Rețea de test LTE cu celule mici cu capabilități de beamforming

Obiectivul principal al constituirii mediului de testare a fost investigarea performanțelor unei rețele LTE eterogene și analiza fezabilității utilizării celulelor mici pentru acoperirea cu semnal a interiorului clădirilor, atunci când celula mică este localizată în afara clădirii sau în interiorul ei. Măsurătorile au fost făcute în banda de frecvență 2.6 GHz, utilizând o lățime de bandă de 10 MHz, utilizând un canal dedicat [12].

În cadrul experimentului nostru, celula mică, având un sistem de 8x8 antene, a fost poziționată în exteriorul clădirii, fiind montată pe peretele exterior la nivelul etajului din mijloc al clădirii. Săgeata din Figure 2 evidențiază direcția principală a fascicolului generat de celula mică. În continuare ne vom referii la aceasta direcție prin fascicolul la 0°. În timpul măsurătorilor, fascicolul a fost repositionat electronic la +/-30° în plan orizontal. Pentru fiecare poziționare a fascicolului am efectuat măsurători independente în interiorul clădirii (în timpul măsurătorilor doar o instanță a fascicolului a fost activă). Considerând cele trei scenarii analizate pentru acoperirea cu semnal a clădirii: doar o celula cu capabilități de beamforming, utilizând o celulă PICO în interiorul clădirii sau

utilizând două celule PICO în interiorul clădirii, putem concluziona că demonstratorul de beamforming ne permite acoperirea cu semnal a clădirilor prin montarea celulei mici în exteriorul clădirii, având în același timp posibilitatea de a ajusta direcția de radiație a antenei de la distanță fără costuri suplimentare.

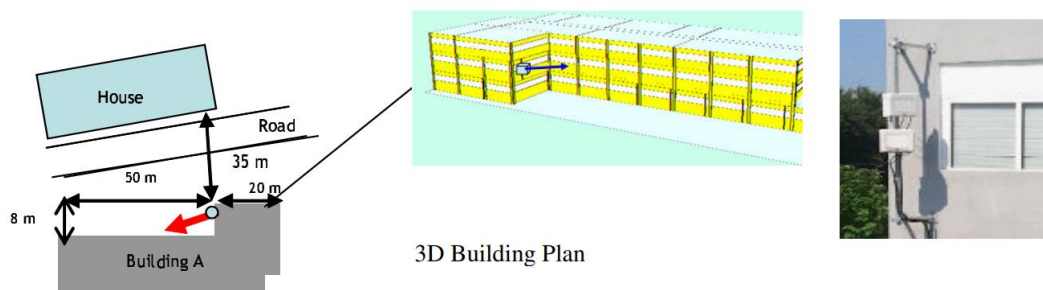


Figure 2: Cladirea folosită pentru experimente, în diferite vizualizări.

Analizând valorile de SNR am observat o zonă cu interferențe mari în apropierea ferestrelor, în acel punct în care candidația de unde electromagnetice reflectate este maximă. Această zonă cu interferențe ridicate poate fi determinată atât empiric cât și teoretic.

Rezultatele experimentale obținute evidențiază fezabilitatea utilizării beamforming-ului în cazul implementărilor cu celule mici montate în exterior pentru densificarea rețelelor LTE în interiorul clădirilor. Folosind o singură celulă de puter mică cu antenă directivă suntem capabili să obținem o acoperire buna a interiorului unei clădiri de dimensiuni medii (Doar 5% din locațiile analizate au prezentat valori ale SNR sub 7 dB), putând asigura rate de transfer mari în majoritatea locațiilor din interiorul clădirii (pentru o viteză maximă de transfer de 30 Mbps, am obținut valori de peste 15 Mbps pentru mai bine de 85% din punctele în care am efectuat măsurători). Valori asemănătoare am obținut și în cadrul altor campanii de testare efectuate pe rețele LTE comerciale având alte clădiri țintă.

Pentru fiecare valoare a azimutului am determinat aria de acoperire a antenei și am demonstrat prezervarea acesteia în interiorul clădirilor pentru diferite poziționări ale antenei. Aceste rezultate încurajează folosirea sistemelor de antena cu mai multe fașicole înguste și câștig mare pentru acoperirea cu semnal a spațiilor interioare. Împrăștierea semnalului în interiorul clădirilor permite acoperirea eficientă și a zonelor care nu se află în câmp deschis relativ la antena de transmisie, contribuind astfel la o acoperire continua cu semnal a

clădirilor. În urma măsurătorilor am determinat o împrăștiere unghiulară redusă a fașcicolului la emițător, și o împrăștiere unghiulară mare la receptor.

Nu în ultimul rând, am demonstrat analitic performanța modelului 3D de predicție, pe care l-am calibrat și validat cu ajutorul măsurătorilor facute pe rețeaua reală. Modelul de lucru dezvoltat de noi oferă nivele detaileate de performanță în orice punct de interes din clădire. Cu ajutorul lui putem determina numărul minim de stații de bază necesare acoperirii cu semnal a unei anumite clădiri pentru anumite servicii garantate, precum și cele mai propice locații pentru montarea acestora (locație, azimut, elevație și putere de transmisie). Rezultatele foarte asemănătoare obținute atât empiric cât și teoretic ne încurajează să folosim pe viitor aplicația de predicție, complementar cu măsurătorile la fața locului, ca și suport în implementarea rețelelor eterogene [4].

3.2 Îmbunătățirea acoperirii rețelelor LTE tradiționale prin folosirea tehnologiilor Small Cell

Un atribut esențial a rețelelor mobile este abilitatea acestora de a acoperi cu semnal în mod eficient o suprafață teritorială. Din perspectiva candidativă, regulatorii naționali impun rețelelor comerciale două cerințe: pe de o parte să asigure o acoperire teritorială procent din suprafața totală a țării, iar pe de altă parte să asigure o acoperire procentulă a populației unei. Abordarea calitativă ține cont de experiența trăită de utilizatori Quality of Experience prin parametrii ca: rata de success a apelurilor telefonice, rata de blocare, rata de întreruperi sau calitatea convorbirii (MOS- Mean Opinion Score) [13].

În abordarea calitativă, segmentul in-building devine o componentă importantă a calității rețelei per ansamblu. O soluție ieftină și slab poluantă electromagnetic pentru a satisface nevoile de calitate în interiorul clădirilor este oferită de folosirea celulelor de tip small cell.

Pentru scenariu analizat în această parte am folosit doua celule LTE de tip Metro, montate în interior, în conjuncție cu o celulă Macro, montată în exteriorul clădirii pentru a putea profita atât de puterile reduse de transmisie a celulelor mici, cât și de ușurința instalării și configurării lor. Una din cele două celule Metro instalate în clădire am folosit-o împreună cu celula Macro, pentru acoperirea cu semnal util a clădirii, în timp ce a doua am folosit-o pentru a genera interferențe în banda de frecvență a celulei Macro. Analizând rezultate obținute, putem afirma că utilizarea celulelor Metro pentru a crește calitatea serviciului în interiorul clădirilor, fără a afecta serviciul exterior, este o soluție eficientă și practică. În același mediu, ai aceeași configurație, am efectuat și teste de

handover, în cadrul cărora am demonstrat capabilitatea celulelor metro de a prelua convorbiri ce vin dinspre nivelul macro, oferind în acest mod o continuitate a serviciilor pentru utilizatori ce vin din mediul exterior înspre interiorul clădirilor.

4. Îmbunătățiri și optimizări în rețelele Eterogene

Traficul de comunicații fără fir continuă să crească rapid datorită adoptării pe scară largă a dispozitivelor de telefoane inteligente și a extinderii rapide a aplicațiilor mobile. Pentru a susține creșterea traficului în paralel cu îmbunătățirea acoperirii rețelei, sunt necesare inovații tehnologice constante. Eforturile de dezvoltare în LTE sunt orientate spre creșterea eficienței utilizării spectrului și reducerea "prețului pe bit". Toate acestea sunt atinse folosind tehnologii hardware de ultimă generație cu caracteristici avangardiste.

Arhitectura HetNet cu suprapunerea celulelor de putere mică peste stratul macro folosind aceeași interfață radio reprezintă o direcție de evoluție promițătoare. Aceasta validează integrarea diverselor tehnologii și a arhitecturilor de rețea pentru obținerea unei eficiențe ridicate a spectrului și a calității serviciilor (QoS) [4]; [14].

Celulele mici sau stațiile de bază celulare mici conțin o serie de tehnologii diferite, dar le pot descrie ca pe orice altceva decât pe un site tipic macro. Acestea sunt implementate pentru a aborda problemele de capacitate a rețelei într-o zonă relativ mică, hotspot sau o zonă importantă care este o sub-arie a ariei de acoperire macro. Celulele mici au de obicei o rază de la 10 metri (femto) până la câteva sute de metri(metro) [15].

4.1 Îmbunătățirea performanțelor pe legătura așcendentă

În această secțiune vom explora performanțele de conexiune în legătură așcendentă într-o rețea LTE eterogenă. Pe baza experimentelor am analizat performanța sistemului în diferite configurații LTE HetNet și am subliniat avantajul utilizării celulelor mici. Am realizat un set de experimente în două configurații LTE HetNet diferite și ne-am concentrat pe îmbunătățirea acoperirii cu semnal și pe creșterea capacității pe legătura așcendentă într-o clădire de birouri. Rezultatele curente au fost obținute cu un singur utilizator(UE) pe celulă, dar recomandările de optimizare a rețelei sunt valabile și pentru scenariul multi-UE, cu sau fără mobilitate [16].

Analiza de față se bazează pe doi dintre cei mai importanți indicatori ai experienței utilizatorilor finali:

- viteza de transfer la nivelul utilizatorului final
- puterea consumată de UE

În rețelele LTE HetNet sunt combinate stații de bază cu puteri de transmisie diferite. Stațiile de putere mare asigură semnal pentru celulele macro, în timp ce stațiile de putere mică deservește celule localizate în interiorul ariei de acoperire a celulei macro. Toate celulele sunt interconectate prin interfețele S1/X2 și sunt amplasate de operator pe baza unei planificări riguroase.

Rezultatele experimentale sugerează că o densificare a rețelei utilizând tehnologia celulelor mici este foarte recomandată pentru acoperirea spațiilor interioare. În plus, celulele mici sunt potrivite pentru densificarea rețelei în zone bine delimitate, cu o densitate mare de utilizatori. Măsurătorile raportate s-au efectuat fără activarea funcției de coordonare a interferenței intersimbol în DL (eICIC) în rețeaua experimentală datorită numărului redus de celule mici din cluster, dar activând algoritmul maxim combinat (MRC) în UL. O analiză amplă privind oportunitatea utilizării funcționalității eICIC este prezentată în lucrarea [17], unde se demonstrează că câștigul de capacitate a clusterului crește proporțional cu numărul de celule mici din cluster. Fiecare experiment prezentat în această lucrare a fost repetat de cel puțin 50 de ori și rezultatele au fost mediate.

4.2 Optimizarea mecanismului de Handover în rețelele HetNet prin utilizarea RSRQ ca și declanșator

În rețelele LTE, performanța de handover este de mare importanță. În acest capitol sunt prezentate rezultatele obținute în timpul mai multor experimente de handover în rețele LTE eterogene, luând în considerare declanșarea evenimentului A3 funcție de diferiți parametri: RSSP și RSRQ. De asemenea, oferim câteva recomandări pentru optimizarea parametrilor pentru diferite scenarii. Toate măsurătorile sunt efectuate într-un mediu cablat în condițiile caracteristice pentru mediile dens urbane. Rezultatele noastre arată îmbunătățirea considerabilă a doi indicatori importanți pentru experiența utilizatorilor finali: viteza de transfer de date și consumul de energie al echipamentului utilizator (UE) [18].

Configurația RF este complexă și implică mai multe componente care creează un mediu controlabil. În scenariul de testare două eNodeB-uri sunt luate în considerare: o celulă macro și o celulă mică care transmit ambele în 2 LTE - bandă 1900 MHz, fiecare folosind o lățime de bandă adiacentă de 10 MHz din lățimea de bandă totală de 20 MHz. Platforma de testare am dezvoltat-o pornind de la schema din figura Figure 3 încercând să emulăm un mediu dens-urban, cu o stație de bază macro amplasată în exteriorul clădirii sub forma unei antene umbrelă, afectată de zgomot AWGN generat de emulatorul de canal și o celulă mică localizată în interiorul clădirii[15]. Pentru a putea introduce zgomot doar în UL sau doar în DL am folosit circuitoare de semnal care separă cele două sensuri fiind conectate ca și în figura Figure 3.

Atunci când UE intră în clădire, apare o degradare semnal semnificativă a semnalului recepționat de pe celula macro și se declanșează o procedură de HO. Analizând rezultatele, putem afirma că utilizarea pe scară largă a RSRP ca declanșator de transfer, chiar și în mediul interior, are ca rezultat o rată de transfer mult mai scăzută pentru mutarea mobilelor care trec de la o celulă macro la una metro. În plus față de îmbunătățirea capacității, reducerea consumului de energie este un alt factor important care îmbunătățește experiența generală a utilizatorului.

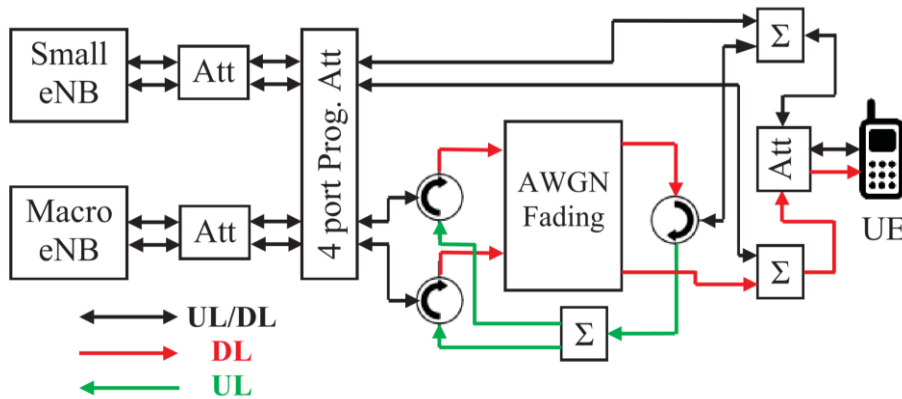


Figure 3: Mediul de testare cablat

4.3 Reducerea interferențelor în rețelele eterogene

Arhitectura eterogenă introduce, de asemenea, mai multe provocări referitor la procedurile de acces radio precum și la mobilitate. În plus, încorporarea și coexistența celulelor macro și a celor mici introduc câteva scenarii noi de interferență care pot degrada considerabil performanța generală a sistemului.

Într-o abordare inițială, evitarea interferențelor este adresată prin intermediul ICIC în domeniul frecvențelor și se bazează pe tehnica de transport-agregare (CA). În cealaltă abordare, evitarea interferențelor și utilizarea ineficientă a resurselor în interiorul CS sunt abordate prin ICIC în domeniul timpului. Această nouă tehnică eICIC depășește aceste două probleme prin extinderea razei celulei mici prin adăugarea așa-numitei Extensii a Domeniului de Celulă (CRE) și prin rezervarea pentru această zonă a unei părți din resursele celulei macro prin abordarea Almost Blank Subframes (ABS) [19]; [20].

Scopul experimentelor este de a analiza funcționalitatea eICIC în arhitectura specifică a rețelei. În toate scenariile experimentale considerăm același raport de 30% pentru rezervarea resurselor ABS și valori diferite de expansiune a intervalului de extensie. În experimentele inițiale, mobilul este atașat la celula mică și are un transfer DL permanent, atingând capacitatea maximă a celulei de aproximativ 100 Mbps. Din acest punct, UE începe să se miște cu viteză constantă spre celula macro. UE efectuează HO și modifică celula de bază, continuând să se miște în interiorul zonei Macro până când atinge cea mai bună calitate a semnalului. După aceasta, UE se întoarce înapoi în celulă mică, prin mutarea lui cu aceeași viteză până când atinge din nou cea mai bună calitate a semnalului, de asemenea, pe celulă mică [17].

Pentru a afla cea mai bună valoare de compensare pentru eICIC, am repetat experimentul pentru diferite valori de offset între 1 și 10 dB. Pentru o analiză mai relevantă a eficienței spectrale a CRE, calculăm media CQI pentru fiecare valoare de compensare. Valoarea optimă a offsetului este de 6dB și corespunde CQI-ului maxim și, prin urmare, maximului de eficiență spectrală. Pentru valori de offset mari, eficiența eICIC scade, datorită condițiilor radio necorespunzătoare pentru UE la marginea celulelor mici, pe măsură ce raza celulei mici crește.

În cel de-al doilea experiment, am analizat capacitatea clusterului prin măsurarea cantității totale funcție de numărul de mobile. Considerăm mai întâi cel mai simplu caz al unui cluster cu o singură celulă mică. Pe baza acestui rezultat, analizăm comportamentul clusterului atunci când crește numărul de celule mici. Pentru această analiză, toate celulele mici sunt considerate a fi situate aproximativ la aceeași distanță față de Macro eNodeB, fara suprapunere a ariei de acoperire cu celulele mici vecine.

Din analiza rezultatelor experimentale putem concluziona că, chiar și în cel mai rău scenariu, când clusterul conține numai o celulă mică situată în zona acoperită de macro, activarea mecanismului eICIC mărește eficiența spectrală a clusterului.

5. Analiza experienței utilizatorilor în rețelele mobile

Din perspectiva rețelei, performanța sistemului poate fi măsurată prin colectarea și investigarea indicatorilor tehnici cunoscuți sub numele de parametri Quality of Service (QoS). Acești indicatori relevanți colectați la nivelul rețelei sunt: viteza de transfer, întârzierea pachetelor, jitter și rata de pierdere a pachetelor. La nivelul mobilului parametri sunt: nivel de semnal, nivel de zgomot și interferență, timp de stabilire a conexiunii și rată de deconectare a conexiunii.

Calitatea experienței reprezintă performanța generală a unui sistem din punctul de vedere al utilizatorului final și este afectată de diverși factori tehnici, de percepție și contextuali. QoE poate fi apreciat ca o măsură a nivelului de performanță end-to-end din perspectiva utilizatorului și ca un indicator al cât de bine acest sistem răspunde nevoilor utilizatorilor. De fapt, QoE oferă o măsură a percepției umane, a trăirilor și a sentimentelor pe care le trăiește în timpul utilizării unui produs, a unei aplicații sau a unui serviciu [21]; [22]. În acest context este critic să identificăm care sunt așteptările de la o aplicație multimedia mobilă asociată cu calitatea serviciului rețelelor mobile în contextul fiecărui utilizator, precum și colectarea feedback-ului.

Testarea pe teren este o parte esențială a implementării rețelei care începe în stadiul incipient al operării în rețea și oferă măsurători în lumea reală a mediului RF. Pe de altă parte, testarea pe teren este o tehnică consumatoare de timp și necesită echipamente foarte scumpe. Din aceste motive, versiunile LTE 10 și 11 propun minimizarea testelor folosind dispozitive dedicate prin introducerea unor noi capacități de măsurare UE.

Metoda alternativă colectează măsurătorile făcute de echipamentul utilizatorului: acestea pot fi măsurători regulate (pentru controlul puterii, HO, ajustarea referinței de timp) trimise de utilizator către eNodeB sau măsurătorile furnizate de aplicațiile speciale instalate pe mobil. Aceste aplicații sunt dezvoltate pe baza noilor capacități oferite de telefoanele de tip smart phones.

În cadrul studiului nostru am folosit o tehnică bazată pe aplicația DATUM dezvoltată de compania SPIRENT Technologies [23]. Datum este o aplicație care poate fi descărcată de pe magazinele online și instalată pe mobile. Această aplicație se conectează la servere locat în cloud, incluzând: serverul de apeluri, utilizat pentru inițierea testelor, serverul media care conține fișierele media și serverul bazei de date unde sunt stocate rezultatele măsurătorilor. Testele reprezentative includ: navigarea pe web, transferul de fișiere, date streaming, multiservice (apel vocal și date) și latență. Sunt dezvoltate scenarii de testare

centralizate, iar sarcinile pot fi combinate în orice ordine dorită de preferință în scopuri de testare.

5.1 Folosirea mobilului ca și echipament de măsură

Pentru experimentul de față am realizat un set de măsurători pe rețele mobile reale, folosind terminale comerciale. În acest sens am transformat un mobil real într-un echipament de măsurare prin utilizarea funcționalităților oferite de aplicația client a platformei DATUM. În ecuația complexă a experienței utilizatorilor finali sunt implicați mai mulți factori, cum ar fi: calitatea vocii, performanța apelurilor, performanța datelor, navigarea pe Internet, performanța video, precizia locației și performanța aplicațiilor și durata de viață a bateriei. Analizând toți acești parametri, estimează un parametru important, dar și subiectiv, legat de experiența utilizatorului final: percepția utilizatorului. Propunem o soluție pentru creșterea calității experienței (QoE), care constă în densificarea rețelei cu celulele mici personalizate pentru o clădire vizată.

Cele două aspecte vizate în cadrul cercetării noastre au fost:

- Analiza fezabilității folosirii mobilelor comerciale ca și aparat de măsură.
- Evaluarea calității serviciilor oferite de doi operatori de telefonie prin prisma performanțelor rețelelor 3G și 4G în interiorul unei clădiri de birouri tipice și propunerea unor variante de densificare a rețelei pe baza rezultatelor optinute.

Testele au fost efectuate la primul etaj al clădirii, cu o viteză medie de deplasare de 5km/h, având o înălțime medie a utilizatorului final de 1.5 m.

Pentru toate testele, accentul nostru a fost analiza rețelei LTE, dar am efectuat și un set limitat de măsurători în 3G pentru a furniza un set de date de referință. În cadrul testelor am folosit mobile de la diferiți producători (Samsung, LG și Sony) pentru a diminua impactul generat de categoria UE, platforma hardware și tipul de procesor de semnal la rezultatele noastre finale.

Pentru a avea o imagine exactă a experienței utilizatorului final pentru diverse servicii, am dezvoltat și executăm următoarele tipuri de teste:

- Transfer FTP simultan pe 2 mobile cu capabilități LTE
- Teste comparative de downlink FTP între 3G și LTE
- Teste comparative de downlink HTTP între 3G și LTE
- Testul Downlink + Uplink FTP simultan pe 2 mobile LTE

Prin urmare, pentru a satisface așteptările clienților, operatorii de rețea trebuie să crească densitatea rețelei. În mediul considerat densificarea cu celule

macro este greu de realizat datorită interferențelor mari și a normelor de siguranță publică în ceea ce privește radiațiile electromagnetice. Soluția fezabilă recomandată rămâne implementarea celulelor mici într-o rețea heteroloagă [25].

5.1 Monitorizarea radiațiilor electromagnetice la care este supus corpul uman țin rețelele eterogene

Pentru a putea reduce nivelul radiațiilor, trebuie în primul rând să înțelegem natura acestora, să învățăm cum să le evaluăm calitativ și calitativ și să avem un instrument adecvat care să le poată [26].

În ultimii ani, utilizarea dispozitivelor de comunicații fără fir în imediata apropiere a corpului uman a crescut dramatic. Riscul de radiații electromagnetice a fost adesea luat în considerare și rata de absorbție specifică este una din caracteristicile importante utilizate pentru evaluarea energiei EM absorbite de corpul uman. Rata specifică de absorbție (SAR- Specific Absorption Rate) reprezintă un factor limitator în rezonanța magnetică înaltă. Această secțiune vom prezenta o abordare teoretică în analiza penetrării câmpului electromagnetic și monitorizarea radiației rețelei printr-o aplicație dedicată.

Aplicația SAR Watch (Tracking Radiation Exposure) urmărește măsurarea radiațiilor în funcție de sursele de expunere. Criteriul de clasificare este definit de nivelul de control (ameliorare) pe care utilizatorul îl poate impune asupra surselor. De asemenea, trebuie să se țină seama de capacitățile fizice ale telefonului, care sunt uneori limitate de deciziile constructive ale producătorului.

În funcție de natura radiației, se propun două categorii: radiația efectivă produsă de telefonul mobil și radiațiile ambientale produse de echipamentele de comunicații fără fir. Radiația specifică telefonului mobil include radiația a cărei sursă este strict limitată la UE. Acest tip particular de radiații este cel mai dăunător pentru corpul uman și reprezintă cea mai dominantă parte din expunerea totală cumulată la care este expus un individ.

Logica de prezentare a datelor colectate din utilizarea exclusivă a telefonului urmează și abordarea de rafinament a sursei. Cele două domenii de interes care surprind prin interfața aplicației sunt:

- expunerea datorată de inițierea unei convorbiri telefonice
- expunerea datorată transferului de date mobile

Evidențierea unei zone în care a fost efectuată o măsurătoare se face prin suprapunerea unui cerc care este colorat în funcție de nivelul expunerii. Punctul

de origine al cercului este dat de coordonatele GPS ale acelei măsurători. Nivelul de zoom al unei vizualizări de hartă este dat de distanța dintre ultimele măsurători și poziția actuală a utilizatorului.

În sistemul de operare Android, implementarea stratului de abstractizare hardware (HAL) care utilizează direct resursele hardware (modem GSM, senzori etc.) rămâne o datorie pentru producătorii de smartphone-uri și nu pentru furnizorii de sisteme de operare. Testarea efectivă a aplicației pe telefoanele Android a scos în evidență diferențele de implementare (mai ales în HAL) dintre modulele critice și mai târziu folosite de regulile de afaceri ale aplicațiilor. Prin urmare, încercăm să găsim câteva soluții complementare pentru a minimiza impactul deciziilor producătorului.

6. Concluzii

Celulele mici sunt stații de bază low-cost, cu putere redusă destinate să îmbunătățească acoperirea și capacitatea rețelelor fără fir. Prin implementarea unor celule mici în completarea rețelelor tradiționale macro-celulare, operatorii se află într-o poziție mult mai bună de a oferi utilizatorilor finali o calitate mai bună și mai bună a experienței (QoE) [4]. Implementarea celulelor mici este supusă cerințelor de furnizare a serviciilor, precum și constrângerilor reale specifice domeniilor vizate. Pentru o bună uniformitate a serviciului, în zonele dens populate, unde prezența clădirilor este principalul motiv pentru atenuarea semnificativă a semnalului radio, este posibil ca celulele mici să fie foarte apropiate, de ex. în câteva sute de metri unul de celălalt. În mod natural, performanța celulelor mici este în mare măsură dependentă de caracteristicile specifice mediului, cum ar fi materialele utilizate pentru construcția clădirilor, proprietățile lor specifice de propagare și împrejurimile. Este deosebit de important să se caracterizeze în mod corespunzător un mediu în care sunt instalate celule mici.

Rezultatele prezentate aici au fost publicate într-o serie de lucrări co-autorizate de autorul acestei teze. Contribuțiile autorului sunt rezumate în cele ce urmează:

- Demonstrarea prin experimente a fezabilității utilizării panourilor de antene inteligente cu capabilități de beamforming.
- Calibrarea și validarea unei aplicații(WiSE) de predicție a acoperirii cu semnal a clădirilor ce folosește un model analitic 3D prin măsurători.

- Demonstrarea beneficiilor utilizării celulelor mici pentru creșterea acoperirii cu semnal indoor și prin creșterea calității serviciului oferit utilizatorului final.
- Îmbunătățirea performanțelor de handover în rețelele eterogene prin utilizarea parametrului de RSRQ în locul parametrului RSRP.
- Optimizarea parametrilor de eICIC pentru creșterea capacității clasterului eterogen.
- Analiza ratei de absorpție specifică SAR în rețelele eterogene.

Rezultatele obținute validează creșterea performanțelor rețelelor mobile prin introducerea celulelor de putere mică și a celor cu capabilități de beamforming.

O decizie cu privire la ce arhitectură de rețea va fi utilizată pentru rețeaua mobilă va fi luată de fiecare operator de rețea pe baza particularităților mediului și a nevoilor utilizatorilor, dor că rezultatele prezentate în această teză creează premisele pentru dezvoltarea unor rețele eterogene native, în special prin prisma specificităților IoT și 5G.

• Bibliografie

- [1] L-F Pau, Summary Introduction to Wireless LTE*4G Architecture and Key Business Implications, Proffesor Mobile business , 2011.
- [2] "Word Cellular Information Service," 12 07 2018. [Online]. Available: <http://www.wcisplus.com>.
- [3] Health and Safety Authority, A Guide to the Safety, Health and Welfare at Work - Electromagnetic Fields, 2016.
- [4] A.Anpalagan, M.Bennis, R.Vannithamby, Design and Deployment of Small Cell Networks, Cambridge: Cambridge University Press , 2015.
- [5] L.-F. Pau, "Summary Introduction to Wireless LTE*4G Architecture and Key Business Implications," in *Proffesor Mobile business*, 2011.
- [6] J. Acharya, L. Gao, S. Gaur, Heterogeneous Networks in LTE-Advanced, John Wiley & Sons, 2014.
- [7] R.Iyer, J. Zeto, D. Schneider et al., Small Cells, Big Challenge: A Definitive Guide to Designing and Deployng HetNets, 2013.
- [8] R. Clarke, "Expanding Mobile Wireless Capacity: The Challenges Presented by Technology and Economics," *Telecommunications Policy*, 2013.
- [9] A. M. Sadekar, R. H. Hafez, "LTE-A enhanced Inter-cell Interference Coordination (eICIC) with Pico cell adaptive antenna," in *6th International Conference on the Network of the Future (NOF)*, Montreal, QC, Canada, 2015.
- [10] Jr., Robert W.Heath, "Research in wireless communication and signal processing," University of Texas at Austin, [Online]. Available: <http://www.profheath.org/research/heterogeneous-networks/>. [Accessed 01 2019].
- [11] S. Fortune, D. Gay, B. Kernighan, O. Landronand, R. Valenzuela, and M. Wright, "WISE design of indoor wireless systems: practical computation

- and optimization," *IEEE Computational Science and Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 58-68, 1995.
- [12] S. Sessia, S. Toufik, and M. Baker, *LTE: The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice: 2nd Edition*, Wiley, 2012.
- [13] Body of Europea Regulators for Electronic Communications, "BEREC Preliminary report in view of a common," 13 07 2018. [Online]. Available: https://berec.europa.eu/eng/.../7415-draft-berec-and-rspg-joint-report-onfaci_0.pdf.
- [14] A. Damnjanovic, J. Montojo, Y. Wei, T. Ji, T. Luo, M. Vajapeyam, T. Yoo, O. Song and D. Malladi, "A Survey on 3GPP Heterogeneous Networks," *IEEE Wireless Communications Magazine*, pp. 10-21, June 2011.
- [15] I. Petrut, M. Ottesteanu, C. Balint and G. Budura, "Improved LTE Macro Layer Indoor Coverage Using Small Cell Technologies," in *International Symposium on Electronics and Telecommunications 2014*, Timisoara, 2014.
- [16] I. Petrut, M. Ottesteanu, C. Balint and G. Budura, "On the uplink performance in LTE Heterogeneous Network," in *2016 International Conference on Communications (COMM)*, Bucharest, 2016.
- [17] I. Petrut, M. Ottesteanu, C. Balint and G. Budura, "Cluster Capacity Increase through eICIC Technology - An Experimental Analysis," *Buletinul Științific al Universității Politehnica Timișoara, Volume 60(74), Issue 2, 2015*, 2015.
- [18] I. Petrut, M. Ottesteanu, C. Balint and G. Budura, "HetNet handover performance analysis based on RSRP vs. RSRQ triggers," in *38th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), 2015*, Prague, 2015.
- [19] 3GPP, "3GPP TR 25.825 (V1.0.0) 3rd GPP Technical Specification Group Radio Access Network "Dual Cell HSDPA Operation", " [Online]. Available: <https://www.3gpp.org>.
- [20] A. Elnashar, M. A. El-saidny, M. R. Sherif, *Design, Deployment and Performance of 4G-LTE Networks, A Practical Approach*, John Wiley&Sons, 2014.

- [21] J. Goodchild, Integrating data, voice and video – Part II., IP Video Implementation and planning guide, United States Telecom Association, 2005.
- [22] B. Chihani, "User- Centric, Quality of Experience Measurement," in *Intl Conf Mobile Computing, Applications and Services (MobiCASE)*, 2013.
- [23] Spirent, 17 7 2018. [Online]. Available:
<http://corporate.spirent.com/Site/Home/Products /Datum>.
- [24] D. Calin, A. Ö Kaya and I. Petrut, "On the in-building performance and feasibility of LTE small cells with beamforming capabilities," in *2014 IEEE Globecom*, Austin, 2014.
- [25] I. Petrut, M. Otesteanu, C. Balint, R. Poenar and G. Budura, "User Experience Analysis on Real 3G/4G Wireless Networks," *Acta Electrotehnica*, vol. 56, no. 1-2, pp. 131-134, 2015.
- [26] C. Groza, I.Petrut, "Monitoring Heterogeneous Networks Radiations Through A Dedicated SAR Application," in *ne-publicata inca*.