

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Klemen Sladič

Tehnologije mobilnega omrežja LTE

DIPLOMSKO DELO
NA UNIVERZITETNEM ŠTUDIJU
RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKA

Mentorica: doc. dr. Mojca Ciglarič

Ljubljana, 2012

Rezultati diplomskega dela so intelektualna lastnina Fakultete za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani. Za objavlanje ali izkoriščanje rezultatov diplomskega dela je potrebno pisno soglasje Fakultete za računalništvo in informatiko ter mentorice.



Št. naloge: 01878/2012

Datum: 05.11.2012

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko izdaja naslednjo nalogo:

Kandidat: **KLEMEN SLADIČ**

Naslov: **TEHNOLOGIJE MOBILNEGA OMREŽJA LTE**
LTE MOBILE NETWORK TECHNOLOGY

Vrsta naloge: Diplomsko delo univerzitetnega študija

Tematika naloge:

Predstavite razvoj in dosedanje generacije mobilnih omrežij, nato pa še idejo omrežja prihajajoče generacije - LTE. Opišite cilje in zahteve standarda in predvideno arhitekturo omrežnega jedra in omrežja za dostop. Opišite načine digitalne modulacije in pojasnite prednosti in način uporabe metod MIMO. Razložite pojem samoorganiziranja omrežja in kako se vklaplja v koncept omrežja LTE. V zaključku opišite trenutno stanje LTE v Sloveniji. Na testnem omrežju preizkusite izbrano funkcionalnost prenosa podatkov in jo primerjajte z učinkovitostjo prejšnjih generacij. V zaključku rezultate kritično ovrednotite in podajte vizijo nadaljnega razvoja mobilnih omrežij.

Mentor:

doc. dr. Mojca Ciglarič

Dekan:

prof. dr. Nikolaj Zimic



IZJAVA O AVTORSTVU DIPLOMSKEGA DELA

Spodaj podpisani Klemen Sladič, z vpisno številko 24930462, sem avtor diplomskega dela z naslovom:

Tehnologije mobilnega omrežja LTE

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- sem diplomsko delo izdelal samostojno pod mentorstvom doc. dr. Mojce Ciglarič,
- so elektronska oblika diplomskega dela, naslov, povzetek in ključne besede identični s tiskano obliko diplomskega dela,
- soglašam z javno objavo elektronske oblike diplomskega dela v zbirki "Dela FRI".

V Ljubljani, dne 17. decembra 2012

Podpis avtorja:

Zahvaljujem se mentorici, doc. dr. Mojci Ciglarič, za vse predloge, pripombe, strokovno pomoč in mentorstvo pri izdelavi diplomskega dela. Poleg tega bi se rad zahvalil še ženi Sabini, ki me je spodbujala, podpirala in prenašala v zadnjih mesecih zaključka mojega študija na Fakulteti za računalništvo in informatiko.

Kazalo

POVZETEK	9
ABSTRACT	10
1. UVOD	1
2. KRATKA ZGODOVINA RAZVOJA MOBILNIH OMREŽIJ	3
3. MOBILNO OMREŽJE LTE	6
3.1. KAJ PREDSTAVLJA KRATICA LTE	6
3.2. CILJI IN ZAHTEVE STANDARDA	7
3.3. ARHITEKTURA OMREŽJA	8
3.3.1. Omrežno jedro	10
3.3.2. Omrežje za dostop	11
3.4. TEHNOLOGIJE V LTE	12
3.4.1. Digitalna modulacija	13
3.4.1.1. OFDMA	13
3.4.1.2. SC-FDMA	15
3.4.2. MIMO	16
3.4.2.1. Prostorska raznolikost	19
3.4.2.2. Prostorsko multipleksiranje	21
3.4.2.3. Oblikovanje snopa	22
3.4.3. Samoorganizirano omrežje	23
3.4.3.1. Funkcionalnosti omrežja SON	24
3.4.3.2. Arhitektura omrežja SON	26
4. LTE V SLOVENIJI	27
4.1. SI.MOBIL	27
4.2. TELEKOM SLOVENIJE	29
4.3. PRAKTIČNI PREIZKUS OMREŽJA LTE	29
5. SKLEPNE UGOTOVITVE	34
SLIKE	36
LITERATURA	37

Seznam uporabljenih kratic in simbolov

3D (ang.)	Three-dimensional space	Tridimenzionalni prostor
3GPP (ang.)	3rd Generation Partnership Project	Partnerski projekt tretje generacije
AMPS (ang.)	Advanced Mobil Phone System	Napredni sistem mobilnih telefonov
AS (ang.)	Access Stratum	Množica protokolov, ki tečejo med baznimi postajami in mobilnimi napravami
CDMA (ang.)	Code division multiple access	Način dostopa do kanala v radijskih komunikacijah
DFT (ang.)	Discrete Fourier Transform	Diskretna Fourierova transformacija
E-UTRA (ang.)	Evolved Universal Terrestrial Radio Access	Vmesnik za brezžično komunikacijo v mobilnem omrežju LTE
E-UTRAN (ang.)	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network	Glej E-UTRA
EDGE (ang.)	Enhanced Data rates for GSM Evolution	Nadgradnja sistema GSM
EPC (ang.)	Evolved Packet Core	Omrežno jedro
EPS (ang.)	Evolved Packet System	Sistem, ki usmerja medmrežni paketni promet med prehodi
FDMA (ang.)	Frequency Division Multiple Access	Način za dostop do kanala pri večdostopnih protokolih
FTP (ang.)	File Transfer Protocol	Protokol za prenos podatkov
GBR (ang.)	Guaranteed Bit Rate	Zagotovljena količina prenosa podatkov
GPRS (ang.)	General Packet Radio Service	Paketno orientirano mobilno omrežje
GSM (ang.)	Global System for Mobile Communications	Mobilno omrežje
HSCSD (ang.)	High-speed circuit-switched data	Paketno preklapljanje podatkov pri veliki hitrosti
HSDPA (ang.)	High-Speed Downlink Packet Access	Protokol v omrežju UMTS za hitrejši prenos podatkov v smeri proti uporabniku
HSPA (ang.)	High-Speed Packet Access	Skupno ime za HSDPA in HSUPA
HSUPA (ang.)	High-Speed Uplink Packet Access	Protokol v omrežju UMTS za hitrejši prenos podatkov v smeri od uporabnika
IMT-2000 (ang.)	International Mobile Telecommunications-2000	Standard mobilnega omrežja
IP (ang.)	Internet Protocol	Medmrežni/internetni protokol
ITU (ang.)	International Telecommunication Union	Mednarodna zveza za telekomunikacije
LTE (ang.)	Long Term Evolution	Standard mobilnega omrežja

		četrte generacije
LTE-Advanced (ang.)	Long Term Evolution-Advanced	Nadgradnja standarda LTE
MHz (ang.)	Megahertz	Megahertz
MIMO (ang.)	Multiple-Input and Multiple-Output	Antenski sistem z več vhodi in več izhodi
MISO (ang.)	Multiple-Input and Single-Output	Antenski sistem z več vhodi in enim izhodom
MLS (ang.)	Mobile Local Search	Sistem za lociranje mobilne naprave
MME (ang.)	Mobility Management Entity	Entiteta za upravljanje mobilnosti v omrežnem jedru LTE
MU-MIMO (ang.)	Multi User-MIMO	Večuporabniški MIMO
NAS (ang.)	Non-Access Stratum	Množica protokolov, ki tečejo med omrežnim jedrom in mobilnimi napravami
NMT (ang.)	Nordic Mobile Telephone	Analogno mobilno omrežje
NMT-F (ang.)	Nordic Mobile Telephone-France	Francoska različica NMT
NTT (ang.)	Nippon Telegraph and Telephone Corporation	Japonsko telekomunikacijsko podjetje
OAM (ang.)	Operations and Management	Sistem za upravljanje v samoorganiziranih omrežjih
OFDM (ang.)	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing	Način kodiranja digitalnih podatkov na frekvencah z več nosilci
OFDMA (ang.)	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access	Večuporabniška verzija OFDM
P-GW (ang.)	PDN-Gateway	Paketno-podatkovni prehod v omrežnem jedru LTE
PDC (ang.)	Personal Digital Cellular	Japonski telekomunikacijski standard za mobilna omrežja druge generacije
PDN (ang.)	Packet Data Network	Paketno podatkovno omrežje
PHS (ang.)	Personal Handy-phone System	Azijsko mobilno omrežje
PUSCH (ang.)	Physical Uplink Shared Channel	Kanal za prenos podatkov
QAM (ang.)	Quadrature Amplitude Modulation	Analogni in digitalni način modulacije
QoS (ang.)	Quality of Service	Sistem za zagotavljanje minimalnih hitrosti prenosov
QPSK (ang.)	Quadrature Phase-Shift Keying	Algoritem za moduliranje faze
Rx (ang.)	Receive	Prihodni promet, sprejemanje
S-GW (ang.)	Service-Gateway	Servisni prehod
SAE (ang.)	System Architecture Evolution	Ne-radijski del omrežja LTE
SC-FDMA (ang.)	Single-Carrier FDMA	Linearno prekodiran OFDMA
SIMO (ang.)	Single-Input and Multiple-Output	Antenski sistem z enim vhomom in več izhodi
SISO (ang.)	Single-Input and Single-Output	Antenski sistem z enim vhomom in enim izhodom

SMS (ang.)	Short Message Service	Sistem za pošiljanje kratkih tekstovnih sporočil na mobilnih napravah
SON (ang.)	Self-Organizing Networks	Samoorganizirana omrežja
SU-MIMO (ang.)	Single User-MIMO	Enouporabniški MIMO
TACS (ang.)	Total Access Communication System	Mobilno omrežje
TDMA (ang.)	Time Division Multiple Access	Način za dostop do istega frekvenčnega kanala več uporabnikov hkrati
TFT (ang.)	Traffic Flow Template	Predloga za filtriranje prometa
Tx (ang.)	Transmit	Odhodni promet, oddajanje
UMTS (ang.)	Universal Mobile Telecommunications System	Mobilno omrežje tretje generacije
UTRA (ang.)	Universal Terrestrial Radio Access	Glej E-UTRA
UTRAN (ang.)	Universal Terrestrial Radio Access Network	Glej E-UTRA
VoIP (ang.)	Voice over IP	Paketni prenos zvoka po omrežju
W-CDMA (ang.)	Wideband-Code Division Multiple Access	Vmesnik za brezžično komunikacijo v mobilnih omrežjih tretje generacije
WAP (ang.)	Wireless Application Protocol	Standard za dostop do spleta z mobilnimi napravami
WiMAX (ang.)	Worldwide Interoperability for Microwave Access	Standard za brezžično komunikacijo
WLAN (ang.)	Wireless Local Area Network	Omrežje za brezžično povezavo mobilnih naprav z medmrežjem

Povzetek

Glavni cilj diplomskega dela je predstavitev dolgoročne evolucije mobilnih omrežij četrte generacije, ki so zasnovana po mobilnem standardu LTE. Mobilna omrežja četrte generacije trenutno spadajo med najbolj aktualne tehnologije v svetu mobilnih komunikacij in so ponekod že na voljo za komercialno uporabo.

Za lažje razumevanje celotne vsebine je na začetku podana kratka zgodovina razvoja mobilnih omrežij, ki sega od prvih raziskav s področja magnetnega valovanja do sodobnih in prihodnjih mobilnih omrežij. Večji del vsebine se nanaša na opis standarda LTE. Poleg samih ciljev in namena tega standarda je predstavljena tudi zasnova celotnega omrežja in nekatere najbolj pomembne uporabljene tehnologije, kot so modulacija OFDMA, sistemi anten MIMO in samoorganizirano omrežje.

Ker je mobilno omrežje LTE že na voljo tudi v nekaterih mestih po Sloveniji, je predstavljeno tudi trenutno stanje pri nas in načrti za prihodnost. Na koncu so predstavljeni še rezultati praktičnega preizkusa prenosa podatkov in primerjava med teoretičnimi in praktičnimi zmogljivostmi omrežja LTE, ki je trenutno dostopno.

Ključne besede:

Mobilno omrežje, LTE, OFDMA, SC-FDMA, MIMO, samoorganizirano omrežje

Abstract

The main purpose of this thesis is an introduction to long term evolution of fourth generation mobile networks based on LTE mobile network standard. Fourth generation mobile networks are currently one of the most developed technology in the world of mobile communications and are somewhere already available for commercial use.

At the beginning is a short history of mobile networks evolution, for easier understanding. In the history you can find information from first researches of magnetic waves until present and future mobile networks. Most of the chapters are focused on LTE standard. Apart from goals and motivation for this standard, design of whole network is introduced including some of the most important technologies used, like OFDMA modulation, MIMO antenna system, and a principle of self-organizing networks.

Since LTE mobile network is already available in some Slovenian cities, there is a chapter about current situation and future plans regarding mobile evolution in our country. At the end some network speed tests are shown, made on a single currently accessible network.

Key words:

Mobile network, LTE, OFDMA, SC-FDMA, MIMO, self-organizing network

Poglavje 1

1. Uvod

Mobilne komunikacije so postale nepogrešljiv spremljevalec v našem vsakdanjem življenju. Uporabljamo jih tako rekoč vedno in povsod. Komunikacija z uporabo mobilnih naprav poteka po mobilnih omrežjih, ki nam v kombinaciji s fiksnimi omrežji in komunikacijskimi sateliti omogočajo pogovore in prenose podatkov med uporabniki in napravami po vsem svetu.

Od prvih predvidevanj o obstoju elektromagnetnih valov Jamesa Clerka Maxwella iz leta 1857 in prvih uspešnih poizkusov oddajanja in sprejemanja radijskih signalov Guglielma Marconija leta 1895 smo z razvojem komunikacij v štiridesetih in petdesetih letih prejšnjega stoletja prišli do prvega predhodnika sodobne mobilne telefonije. Zaradi visoke cene in tehnoloških težav z vidika mobilnosti in velikosti aparatov pa je bila njegova uporaba močno omejena.

Raziskave na področju elektromagnetnega valovanja in razvoj novih tehnologij na področju elektronike so omogočili postavitev prvega »sodobnega« mobilnega omrežja že v sedemdesetih letih prejšnjega stoletja. S tem so mobilne naprave postale dostopne širši množici, kar je močno povečalo ponudbo, povpraševanje in zahteve na tem področju. Z nadgradnjami obstoječih in postavitvami novih omrežij ter razvojem mobilnih naprav se je močno povečalo tudi število in kvaliteta mobilnih storitev. Mobilni operaterji imajo danes že približno šest milijard, do leta 2018 pa načrtujejo že osem milijard naročnikov [5]. To pomeni, da bo imel v povprečju vsak človek več kot eno mobilno napravo. Priljubljenost mobilnih naprav raste predvsem zaradi njihove dostopnosti, uporabnosti in sodobnega načina življenja. Poleg pogovorov nam omogočajo tudi širokopasovni dostop do medmrežja, VoIP, prenos in dostop do multimedijskih vsebin itd. Poleg telefonije in dostopa do medmrežja pa se mobilne tehnologije uporabljajo še na številnih drugih področjih.

Mobilni operaterji nam ponujajo vedno več storitev, ki so vedno boljše. Vzrok za to sta razvoj in nadgradnja mobilnih omrežij, ki nam to omogočata. Sodobna mobilna omrežja so razvrščena v generacije. Vsaka od generacij pripada določeni množici standardov telekomunikacijskega omrežja. Standardi natančno določajo izvedbo in delovanje mobilnega omrežja, s tem pa tudi njegove lastnosti in zmogljivosti.

Osnovni namen tega dela je predstavitev osnov mobilnega omrežja LTE, ki spada v četrto generacijo mobilnih omrežij. Predstavlja velik korak v evoluciji obstoječih mobilnih omrežij UMTS. Drugo poglavje se nanaša na kratko zgodovino razvoja in lastnosti posameznih generacij mobilnih omrežij. Sledi mu nekaj poglavij, namenjenih izključno lastnostim, izvedbi in zmogljivostim mobilnih omrežij LTE. Predstavljena sta tudi stanje in prihodnost takih omrežij pri nas. Na koncu sledita še poglavji o praktičnem preizkusu mobilnega omrežja LTE in sklepne besede.

Poglavje 2

2. Kratka zgodovina razvoja mobilnih omrežij

Generacije mobilnih omrežij označujemo z zaporedno številko in veliko črko G. Tako danes poznamo generacije, kot so 0G, 1G, 2G, 3G, 4G in 5G. Poleg teh obstajajo še oznake za posodobitve določene generacije, kot sta na primer 2.5G in 2.75G, ki se dovolj razlikujeta od 2G, vendar kljub temu ne zadostujeta standardom generacije 3G. Določene oznake za vmesne generacije, kot je na primer 2.75G, uradno ne obstajajo, vendar se v praksi vseeno uporabljajo.

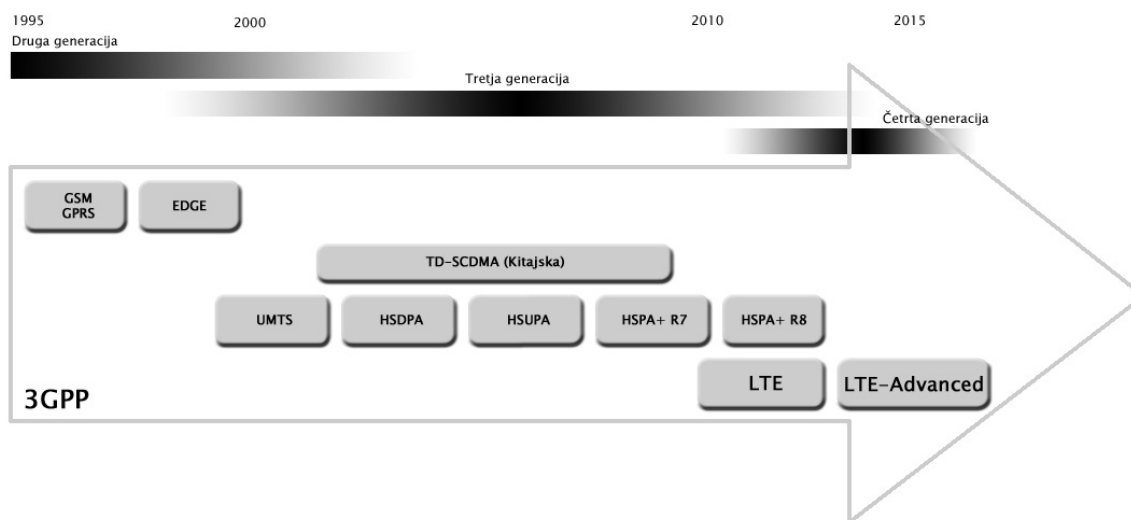
Leta 1981 je bilo na Švedskem postavljeno prvo sodobno analogno mobilno omrežje, ki je omogočalo uporabo lažjih in cenejših mobilnih naprav. V tistih časih je bil mobilni trg še dokaj razpršen, tako da so različne države uporabljale različne standarde za isto generacijo mobilnega omrežja. Takratna omrežja so temeljila na standardih, kot so NMT in NMT-900 v Skandinaviji, NMT-F in RC 2000 v Franciji, TACS v Angliji in na Irskem, NTT na Japonskem, AMPS v ZDA, C-450 v južni Afriki in C-Nets v Nemčiji in Avstriji. Zaradi svojega načina delovanja jih imenujemo tudi celularna (ang. cellular) mobilna omrežja in so delovala na principu preklopnega vezja (ang. circuit-switched). Za dostop do kanalov so uporabljala protokol FDMA. Omogočala so le prenos govora in predstavljajo prvo generacijo mobilnih omrežij 1G. Dostopnost in uporabnost takratnih mobilnih naprav je posledično vplivala na veliko povečanje števila uporabnikov, ki jih je bilo v letu 1990 že približno dvajset milijonov. Danes mobilni analogni sistemi tako rekoč niso več v uporabi.

Mobilno omrežje GSM je bilo prvo omrežje, ki je za izboljšanje kvalitete zvoka uporabljalo digitalno modulacijo. Pojavilo se je leta 1988 in predstavlja drugo generacijo mobilnih omrežij 2G. Omogoča dodatne storitve, kot so pozivnik, faks ter tekstovna (ang. SMS) in glasovna (ang. voicemail) sporočila. Z uporabo tehnologije TDMA in standardov, kot so WAP, HSCSD in MLS, omogoča tudi omejeno uporabo prenosa podatkov. Standard GSM so sprejele vse evropske države. Njegovi tekmeci v drugih državah pa so bili TDMA IS-136 v severni Ameriki, CDMA IS-95 v Severni Koreji in PDC in PHS na Japonskem. Zaradi naraščajoče uporabe internetnega protokola je bila ta generacija pozneje nadgrajena in nastala so omrežja GPRS, ki so omogočala preklapljanje paketov (ang. packet-switching) in s tem tudi prenos multimedije v obliki internetnih paketov. S tem so bili narejeni prvi koraki v

razvoju omrežij tretje generacije, zato omrežja GPRS štejejo med vmesno generacijo 2.5G. Nadaljnja evolucija omrežij GSM je privedla do omrežij EDGE, ki predstavljajo vmesni korak do omrežij W-CDMA. Omogočajo še večje hitrosti prenosa in pripadajo neuradni generaciji 2.75G.

Zaradi potreb po večjih kapacitetah, hitrejšemu prenosu podatkov in QoS smo z razvojem omrežij druge generacije prišli do omrežij tretje generacije 3G. Ta generacija mobilnih omrežij je zaradi svojega načina delovanja zahtevala fizično nadgradnjo radijskih komponent omrežnih naprav. Temelji na množici standardov, ki ustrezajo specifikacijam IMT-2000 s strani ITU in je enotna po vsem svetu, zato med drugim omogoča tudi globalno gostovanje (ang. roaming). V to generacijo spadajo omrežja UMTS, ki v teoriji dosegajo prenose do 2 mbit/s. Prvo omrežje 3G se je pojavilo leta 2002 na Japonskem. Za izboljšanje zmogljivosti uporablja protokol HSPA (HSDPA in HSUPA), ki je bil pozneje nadgrajen s HSPA+. Ta z uporabo novih načinov modulacije še izboljša zmogljivosti omrežja. Spada v vmesno generacijo 3.5G pri prehodu iz omrežij 3G v 4G, kamor spadata tudi omrežji WiMAX in LTE. Različni dejavniki so pozneje vplivali na to, da LTE danes uvrščamo med omrežja 4G.

Časovnica razvoja mobilnih omrežij:



Slika 2.1.: Časovni prikaz razvoja mobilnih omrežij.

Omrežja četrte generacije ponujajo mobilni ultraširokopasovni dostop do medmrežja. Omogočajo IP-telefonijo, mobilno televizijo visoke ločljivosti, 3D-televizijo itd. V to generacijo spadajo mobilna omrežja, ki zadoščajo specifikacijam ITU-Advanced, ki zahteva

prenose vsaj 100 Mbit/s pri visoki in 1 Gbit/s pri nizki mobilnosti. Takšna omrežja se še gradijo in bodo zelo kmalu prišla v uporabo. V to generacijo spadajo omrežja, kot so WirelessMAN-Advanced (Mobile WiMAX Release 2) in LTE-Advanced (LTE-A), ki jim pravimo tudi prava 4G (ang. True 4G) omrežja [3].

Peta generacija mobilnih omrežij z oznako 5G je predvidena kot naslednji večji korak v razvoju mobilnih omrežij. Trenutno se ta oznaka uradno ne uporablja za nobeno določeno javno objavljeno specifikacijo mobilnega omrežja, ampak se uporablja predvsem kot oznaka v različnih raziskavah.

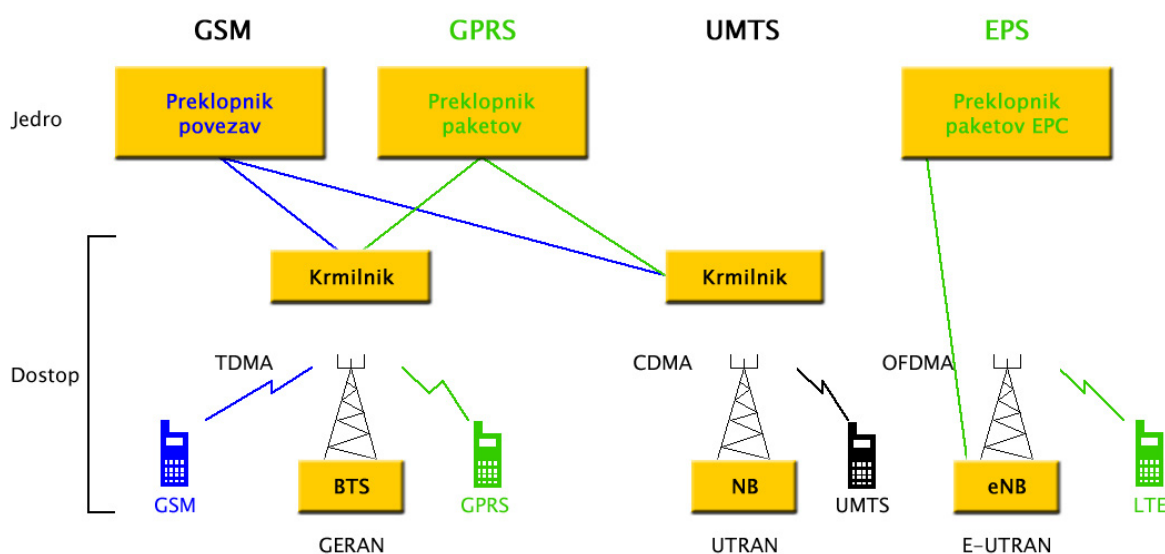
Slika 2.1. prikazuje časovnico razvoja mobilnih omrežij med drugo in četrto generacijo.

Poglavje 3

3. Mobilno omrežje LTE

3.1. Kaj predstavlja kratica LTE

Razvoj mobilnih omrežij UMTS se z nadgradnjo na HSPA in HSPA+ še zdaleč ni končal. Želja po zagotavljanju konkurenčnosti teh omrežij v prihodnosti je privedla do standardov za dolgoročno evolucijo UMTS (UMTS Long Term Evolution) ali LTE. Standard je znan tudi pod imenoma Evolved UTRA (E-UTRA) in Evolved UTRAN (E-UTRAN).



Slika 3.1.: Razvoj mobilnih omrežij od GSM do LTE [1].

LTE je eden od novejših standardov omrežij četrte generacije za brezžično mobilno komunikacijo in predstavlja dostopni del sistema EPS (ang. Evolved Packet System), ki temelji izključno na medmrežnem protokolu IP. Standard je bil razvit v okviru projekta 3GPP, ki je nastal kot rezultat sodelovanja več skupin telekomunikacijskih združenj. V okviru tega projekta je bil standard uradno definiran decembra 2008 s svojo osmo izdajo (ang. Release 8) popravkov in dopolnitev, kar je omogočilo pojav prve omrežne opreme LTE. Standard je dobro definiran in v prihodnje omogoča številne nadgradnje. Standard LTE po svojih specifikacijah prvotno ni spadal med omrežja 4G. Zaradi pritiskov trga in dejstva, da WiMAX, HSPA+ in LTE predstavljajo pomemben napredek pri razvoju omrežij 3G, se je

agencija ITU odločila, da vse tri našete standarde lahko uvrščamo med omrežja 4G. Prvi javno dostopni omrežji LTE sta bili zgrajeni v Oslu in Stockholmu decembra 2009 [1].

3.2. Cilji in zahteve standarda

Standard LTE je namenjen za velike hitrosti komunikacije v mobilnih omrežjih. Temelji na omrežnih tehnologijah GPS/EDGE in UMTS/HSPA. Z uporabo novega radijskega vmesnika in novim omrežnim jedrom poveča kapaciteto in hitrost mobilnega omrežja.

Glavni motivi za nastanek tega standarda so:

- zagotavljanje nadaljnje konkurenčnosti sistemov 3G v prihodnosti,
- zahteve uporabnikov po hitrejših prenosih in QoS,
- sistem, specializiran in optimiziran za preklapljanje paketov,
- zahteve po znižanju stroškov,
- nizka kompleksnost omrežja,
- izognitev nepotrebni fragmentaciji tehnologij za pasove v paru in brez para.

Glavne zahteve omrežja, ki deluje po standardu LTE, so:

- zmanjšanje zakasnitev v omrežju tako pri vzpostavljanju povezav kot pri prenosih,
- znižanje cene na prenesen bit,
- visoka spektralna učinkovitost,
- visok največji možen prenos podatkov,
- kratek povratni čas (ang. round trip) paketa,
- frekvenčna fleksibilnost,
- razumna poraba energije mobilnih naprav,
- mobilnost med različnimi radijskimi tehnologijami za dostop do omrežja,
- medsebojno delovanje omrežnih elementov različnih proizvajalcev,
- glavno arhitekturo predstavljajo bazne postaje enega tipa, imenovane eNodeB,
- uporaba učinkovitih rešitev v smislu delovanja in vzdrževanja vključno s samooptimizacijo,
- enostavna gradnja (nameščanje) in konfiguracija mrežnih elementov, kot so domače bazne postaja ali tako imenovane femto celice.

Glavne zahteve z vidika zmogljivosti so prikazane na spodnji sliki:

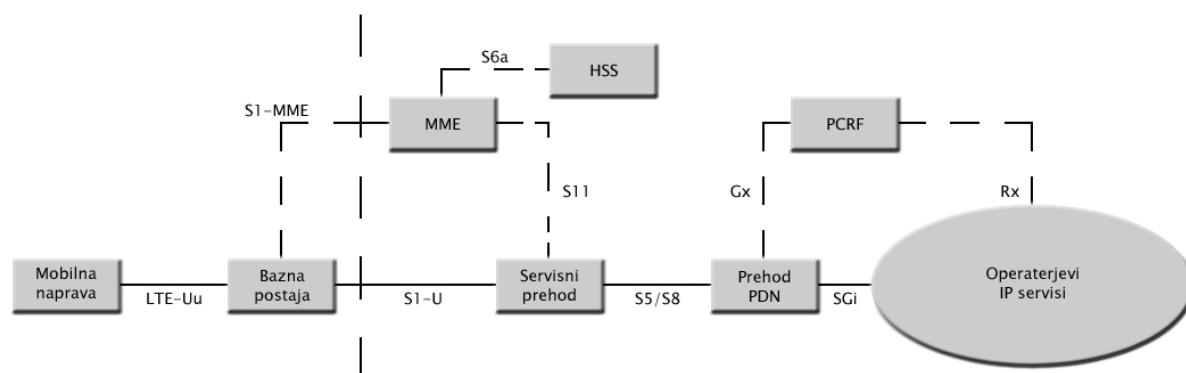
		Zahteva	Primerjava s HSPA	Komentar
Promet proti uporabniku	Največji prenos	> 100 Mbps	7 x 14,4 Mbps	LTE z 20 MHz pasovno širino v FDD načinu, MIMO 2 x 2 Referenca: HSDPA s 5 MHz pasovno širino v FDD načinu
	Največja spektralna učinkovitost	> 5 bps/Hz	3 bps/Hz	
	Povprečna spektralna učinkovitost celice	> 1,6–2,1 bps/Hz/celico	3–4 x 0,53 bps/Hz/celico	LTE z MIMO 2 x 2 Referenca: HSDPA z dvema sprejemnima antenama z 10 uporabniki na celico
	Spektralna učinkovitost na robu celice	> 0,04–0,06 bps/Hz/uporabnika	2–3 x 0,02 bps/Hz	Pri 10 uporabnikih na celico
	Spektralna učinkovitost paketov z razpršenim naslovom	> 1 bps/Hz	Ni podatka	Poseben nosilec za pakete z razpršenim naslovom
Promet od uporabnika	Največji prenos	> 50 Mbps	5 x 11 Mbps	LTE z 20 MHz pasovno širino v FDD načinu, z enojno anteno Referenca: HSUPA s 5 MHz pasovno širino v FDD načinu z enojno anteno
	Največja spektralna učinkovitost	> 2,5 bps/Hz	2 bps/Hz	
	Povprečna spektralna učinkovitost celice	> 0,66–1,0 bps/Hz/celico	2–3 x 0,33 bps/Hz	LTE z enojno anteno Referenca: HSUPA z dvojno anteno
	Spektralna učinkovitost na robu celice	> 0,02–0,03 bps/Hz/uporabnika	2–3 x 0,01 bps/Hz	Pri 10 uporabnikih na celico
Sistem	Zakasnitev pri uporabniku (dvosmerna radijska zakasnitev)	< 10 ms	Ni podatka	
	Zakasnitev vzpostavitve zveze	< 100 ms	Ni podatka	
	Operativna pasovna širina	1,4–20 MHz	5 MHz	Začetna zahteva se je začela pri 1,25MHz

Slika 3.2.: Zahtevane zmogljivosti mobilnih omrežij po standardu LTE [8].

3.3. Arhitektura omrežja

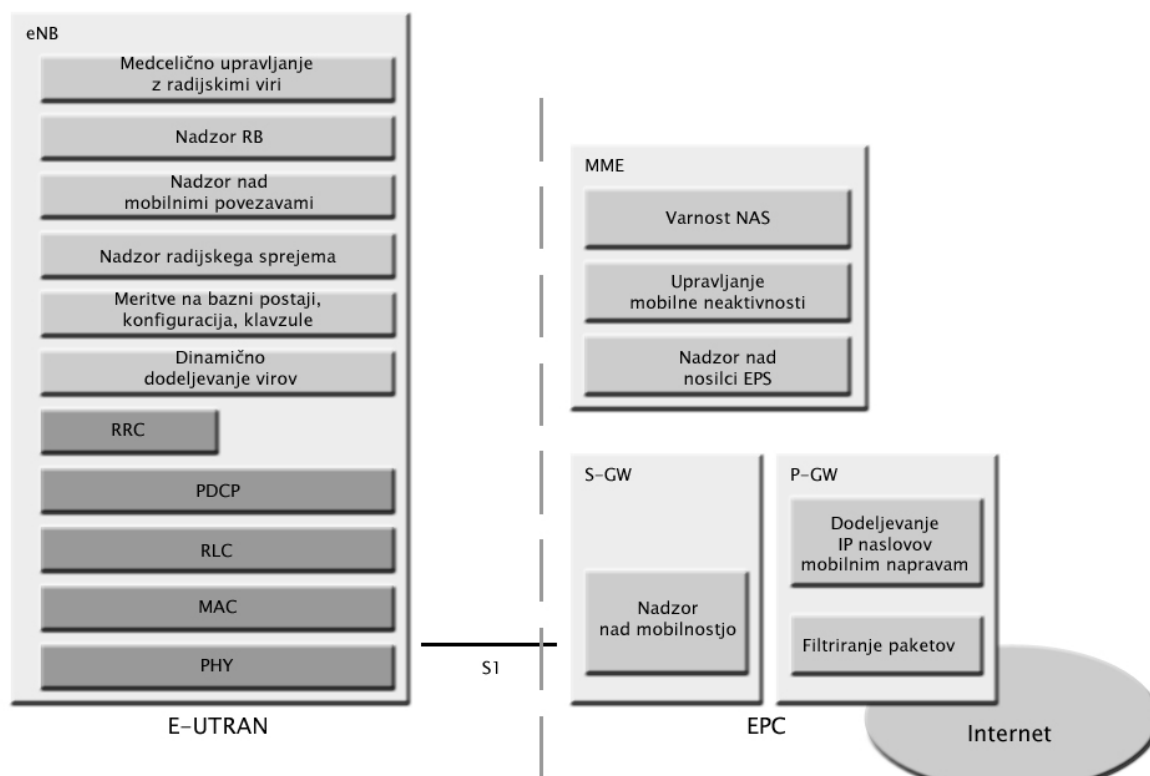
LTE zagotavlja brezžično paketno medmrežno povezavo med uporabniško opremo (mobilnimi napravami) in paketnim podatkovnim omrežjem PDN (ang. Packet Data Network). Uporabnikom zagotavlja nemoteno povezavo tudi med mobilnostjo in prehodi med baznimi postajami. Mobilno omrežje je razdeljeno na radijski in neradijski del. Radijski del LTE se imenuje E-UTRAN, ki ga po navadi označujemo kar z LTE. Vzporedno z razvojem radijskega dela se razvija tudi neradijski del, ki se imenuje SAE (ang. System Architecture Evolution) in vsebuje omrežno jedro EPC (ang. Evolved Packet Core). LTE in SAE skupaj predstavljata tako imenovani EPS (ang. Evolved Packet System). EPS usmerja medmrežni paketni promet med prehodi (ang. Gateway) v PDN in mobilnimi napravami s pomočjo nosilcev EPS (ang. EPS bearers), ki predstavljajo tok paketov z definiranim QoS med

prehodom in mobilnimi napravami. EPS zagotavlja uporabniku medmrežno povezavo s PDN za dostop do medmrežja in drugih storitev, kot je na primer VoIP. Uporabnik lahko istočasno uporablja več različnih nosilcev EPS za dostop do različnih PDN-jev, kar mu omogoča koriščenje več storitev hkrati. Lahko se na primer hkrati pogovarja prek VoIP-a, prenaša podatke prek protokola FTP in dostopa do medmrežja. V takšnem primeru mu nosilec EPS za VoIP zagotavlja kvaliteten pogovor glede na določen QoS, medtem ko nosilca za FTP in splet zagotavljata najboljši možen prenos podatkov (ang. Best-effort). Slika 3.3. prikazuje omrežne elemente sistema EPS. Nekateri najbolj pomembni pa bodo opisani v nadaljevanju.



Slika 3.3.: Omrežni elementi sistema EPS

Omrežje mora zagotavljati tudi varnost in zasebnost, kar zagotovimo z več elementi EPS, ki imajo različne vloge. Slika 3.4. prikazuje arhitekturo celotnega omrežja z vsemi omrežnimi elementi in standardiziranimi vmesniki. Na najvišjem nivoju je omrežje razdeljeno na omrežno jedro, imenovano EPC, in na omrežje za dostop, ki ga predstavlja E-UTRAN. Omrežno jedro vsebuje mnogo logičnih elementov, ki predstavljajo različne vmesnike. Operaterji lahko te vmesnike poljubno prilagodijo (razdelijo, združijo) in s tem omogočijo v enem omrežju sobivanje več ponudnikov hkrati [8].



Slika 3.4.: Arhitektura omrežja LTE

3.3.1. Omrežno jedro

Omrežno jedro (EPC) je zadolženo za nadzor nad mobilnimi napravami in za vzpostavljanje nosilcev. Glavni logični elementi v EPC so:

- **Servisni prehod (S-GW):** skozi ta prehod tečejo vsi uporabnikovi internetni paketi. Zadolžen je za nosilce med mobilnostjo, ko uporabnik prehaja med baznimi postajami (eNodeB). Zbira informacije v smislu količine prenesenih podatkov uporabnikov, ki se uporabljajo za zaračunavanje storitev, in skrbi za medsebojno delovanje tudi z drugimi ne 3GPP tehnologijami, kot sta na primer GPRS in UMTS.
- **Prehod PDN (P-GW):** je zadolžen za dodeljevanje internetnih naslovov mobilnim napravam. Poleg tega v smeri proti uporabniku filtrira internetne pakete po nosilcih, glede na QoS. Filtriranje se izvaja s pomočjo predlog TFT (ang. Traffic Flow Template). P-GW tudi izvršuje QoS za nosilce GBR (ang. Guaranteed Bit Rate) in skrbi za medsebojno delovanje tudi z drugimi ne 3GPP tehnologijami, kot sta na primer CDMA2000 in WiMAX.

- **Entiteta za upravljanje mobilnosti (MME):** predstavlja nadzorno enoto, ki nadzoruje signalizacijo med mobilno napravo in omrežnim jedrom. Med mobilno napravo in omrežnim jedrom tečejo protokoli NAS (ang. Non-Access Stratum). Dve glavni funkciji, ki jih ponuja MME, sta upravljanje z nosilci in upravljanje s povezavami.

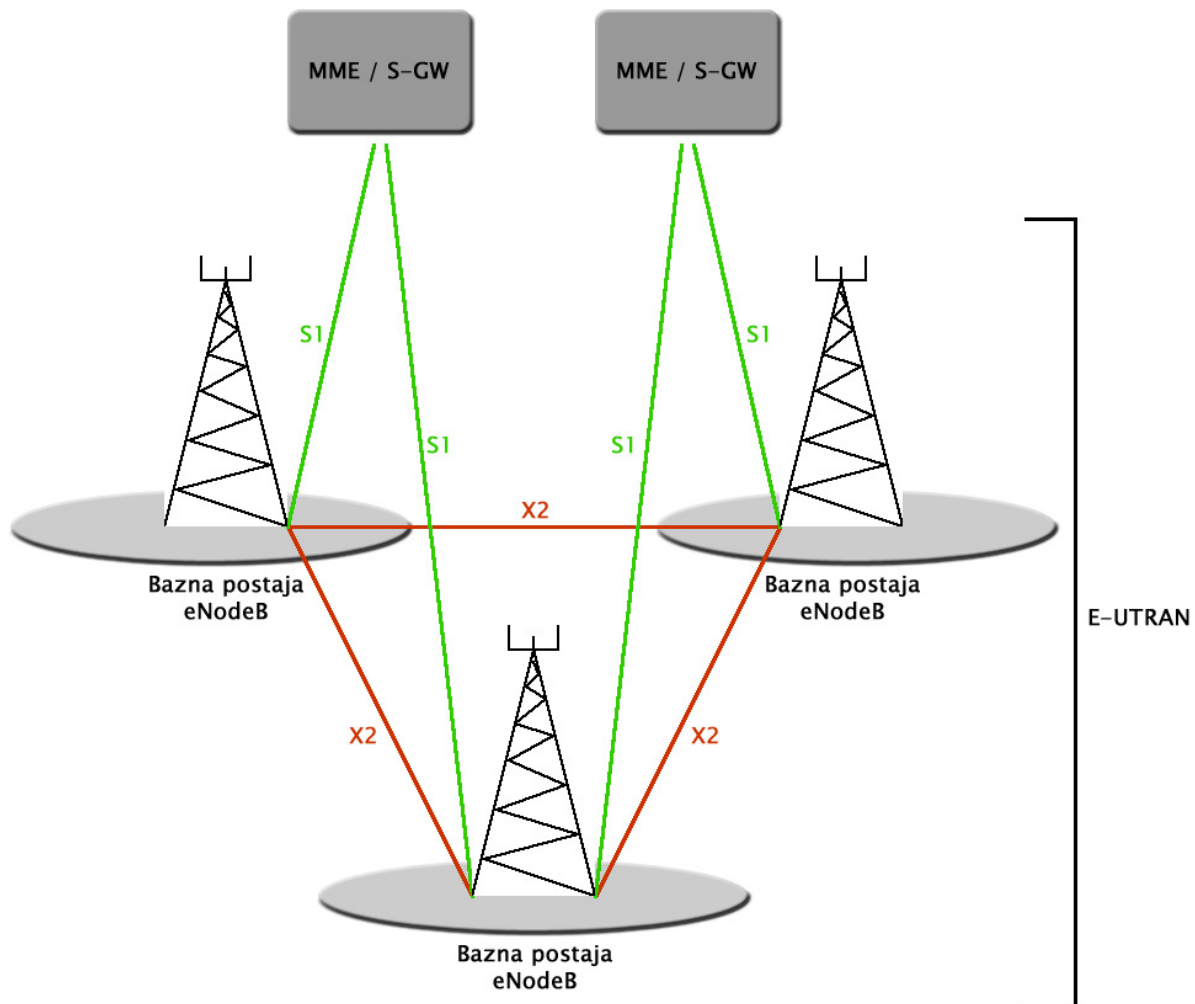
3.3.2. Omrežje za dostop

V primerjavi z omrežnim jedrom je omrežje za dostop predstavljeno z enim samim elementom, imenovanim eNodeB. Predstavlja bazno postajo, ki je lahko naenkrat povezana z več uporabniki. Bazne postaje so med seboj povezane prek vmesnika, imenovanega X2. Vsak od njih pa z EPC prek vmesnika S1, kot prikazuje Slika 3.5. Protokoli, ki tečejo med eNodeB in UE, se imenujejo protokoli Access Stratum (AS). E-UTRAN je odgovoren za vse radijske funkcije, kot so:

- **Upravljanje z radijskimi sredstvi (Radio Resource Management):** pokriva vse funkcije, povezane z radijskimi nosilci. To je nadzor nad nosilci, nadzor nad mobilnostjo, razporejanje in dinamično alociranje virov za promet od uporabnika in proti njemu.
- **Komprimiranje glav paketov (Header Compression):** pri prenosu velikega števila majhnih paketov, kot je recimo pri uporabi VoIP-a, glave paketov predstavljajo velik del prenesenih podatkov. Zato se v takih primerih, zaradi želje po smotrni uporabi radijskih virov, glave paketov pred prenosom komprimira.
- **Varnost:** vsi podatki, preneseni prek radijskega vmesnika, so kriptirani.
- **Povezava z EPC:** je realizirana s signalizacijo v smeri MME in s potjo nosilcev proti S-GW.

LTE omogoča tudi gostovanje. Omrežje nekega operaterja v neki državi imenujemo javno mobilno omrežje (ang. Public Land Mobile Network). Možnosti uporabe mobilnega omrežja, ki je v lasti operaterja, pri katerem nismo direktni naročniki, rečemo gostovanje. Gostujoči uporabnik je povezan na E-UTRAN, MME in S-GW obiskanega omrežja LTE. V primerjavi z drugimi omrežji LTE/SAE omogoča uporabo P-GW gostujočega ali domačega omrežja. Uporaba domačega P-GW uporabniku ponuja storitve domačega ponudnika, kljub temu da gostuje v omrežju drugega operaterja.

Nemoteno delovanje in mobilnost je zagotovljena tudi v kombinaciji z ostalimi omrežji, ki uporabljajo drugačne 2G in 3G tehnologije za radijski dostop, kot so GSM, UMTS, CDMA2000 in WiMAX.



Slika 3.5.: Arhitektura omrežja za dostop.

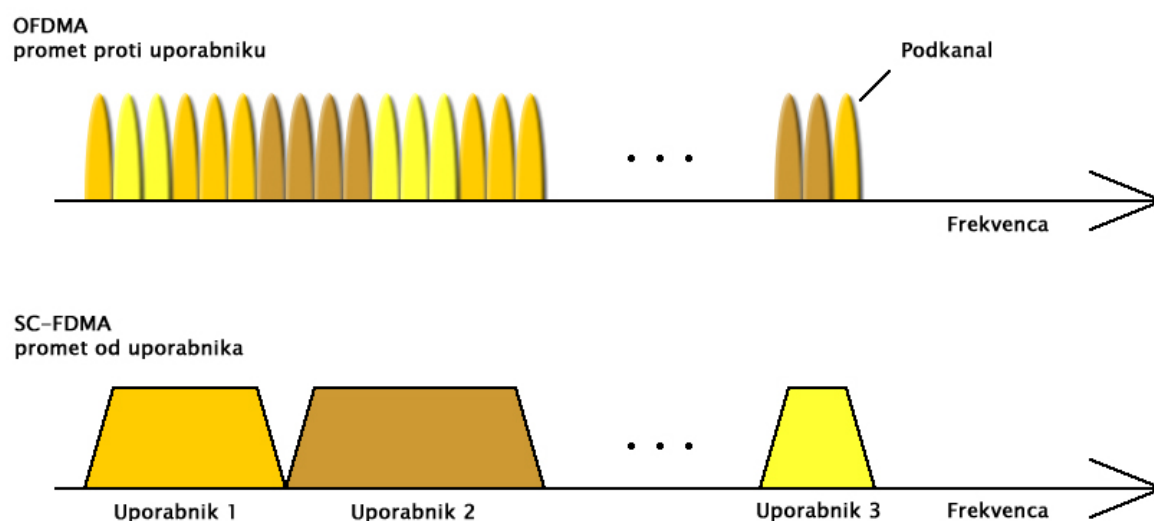
3.4. Tehnologije v LTE

Z vidika zmogljivosti in prilagodljivosti standard LTE postavlja dokaj visoke zahteve, ki jim ni enostavno zadostiti. Zato je za izvedbo takšnega omrežja treba uporabiti najnovejše tehnologije, predvsem s področja radijskih komunikacij. V tem poglavju je opisanih nekaj ključnih tehnologij. Nekatere od teh bodo prvič v praksi uporabljene prav v omrežjih LTE, nekatere pa se že uporabljajo v nekaterih obstoječih sodobnih mobilnih omrežjih.

3.4.1. Digitalna modulacija

Modulacija nam omogoča prenos digitalnega signala prek radijskih frekvenc. Digitalnemu signalu, ki ga želimo prenesti, pravimo modulacijski signal. Z njim lahko spreminjamo frekvenco, amplitudo in fazo nosilnega signala. Cilj modulacije je pretvorba digitalnega signala v signalno obliko, ki je primerna za brezžični prenos.

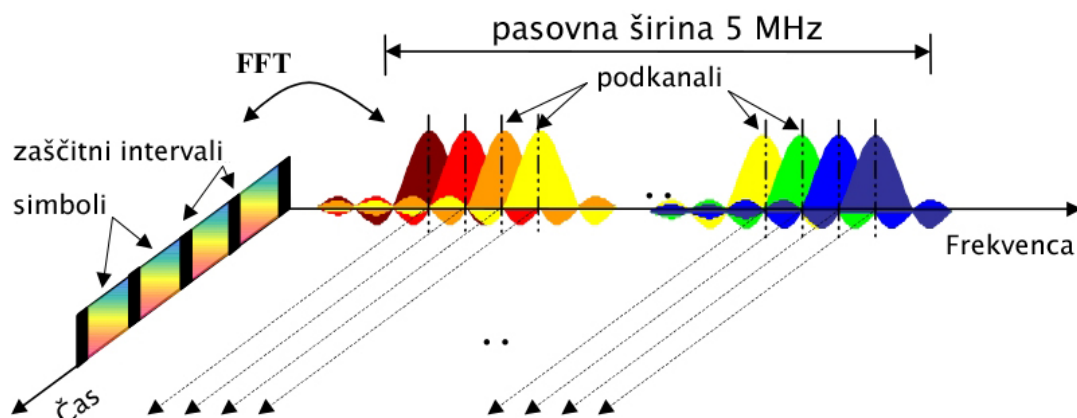
Za doseganje visoke spektralne učinkovitosti radijskih povezav so pri 3GPP za sodostop izbrali izvedbo z več kanali (ang. Multicarrier approach for multiple access). V smeri prometa proti uporabniku (ang. Downlink) se uporablja digitalno modulacijo OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access), v obratni smeri pa SC-FDMA, znan tudi kot z DFT razširjen OFDMA. Oba načina modulacije sta prikazana na spodnji sliki.



Slika 3.6.: Modulaciji OFDMA in SC-FDMA.

3.4.1.1. OFDMA

Za modulacijo v smeri proti uporabniku LTE (v FDD in TDD načinu delovanja) uporablja OFDMA, ki temelji na OFDM. OFDM je kombinacija frekvenčnega multipleksa in modulacije. Razpoložljivi spekter razdeli na več ortogonalnih kanalov, ki jim pravimo podkanali. Vsak od podkanalov je lahko neodvisno moduliran s podatkovnim signalom, ki lahko pripada različnim uporabnikom. Ta način modulacije uporabljata tudi WLAN in WiMAX. Glede na druge načine modulacije ima več prednosti, kot sta na primer slabljenje signala (ang. Multipath fading) in učinkovita arhitektura sprejemnika.

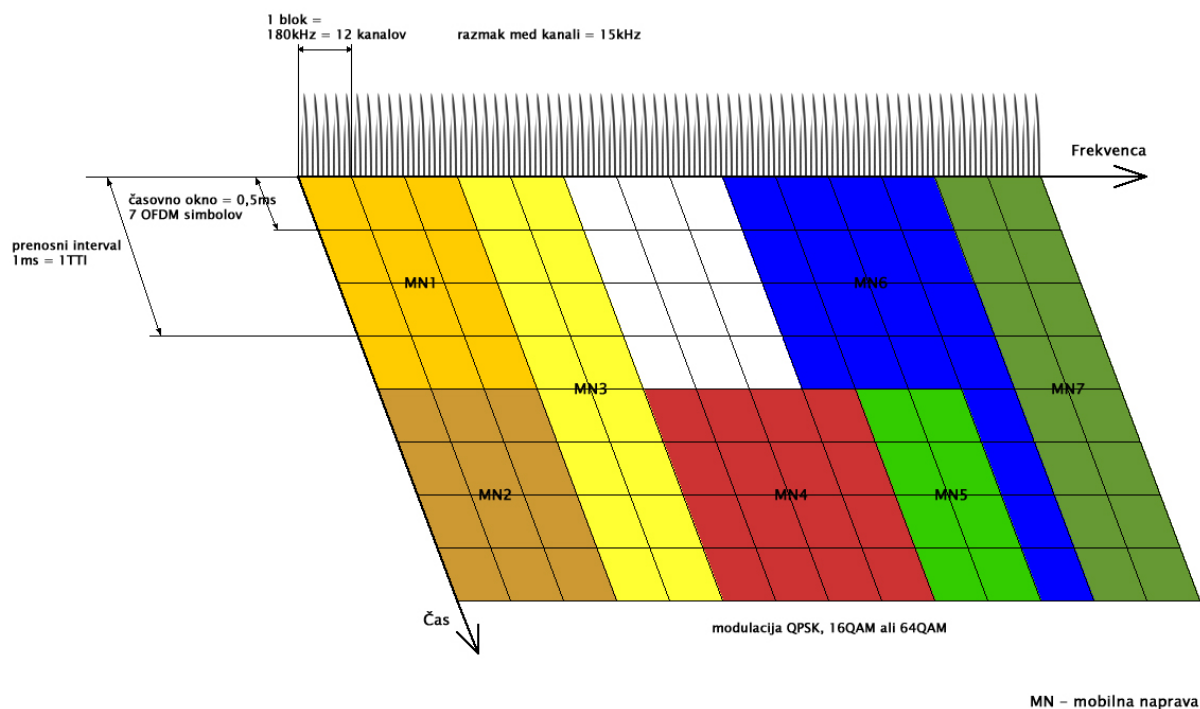


Slika 3.7.: Frekvenčno-časovna predstavitev signala OFDM (Povzeto po [6]).

Slika 3.7. prikazuje signal OFDM s pasovno širino 5 MHz. Princip za druge pasovne širine, ki jih podpira LTE, je enak. Za modulacijo v smeri proti uporabniku se uporabljajo modulacije QPSK, 16QAM in 64QAM. Da bi se izognili notranjim interferencam, ki nastanejo zaradi širjenja zakasnitev v kanalih, lahko simbolom dodamo zaščitne intervale (ang. Guard interval). Zaščitni interval pri OFDM je ciklična predpona (ang. Cyclic prefix), ki je vrinjena pred vsak OFDM simbol.

V primerjavi z OFDM omogoča OFDMA na razpoložljivi pasovni širini dostop več uporabnikom. Ker so kanali na voljo vsem, je lahko vsakemu uporabniku dodeljen določen časovno-frekvenčni vir. Dodeljevanje virov se obnavlja ob vsakem prenosnem intervalu, ki se ponovi vsako milisekundo in se izvaja na bazni postaji. Pri prenosu podatkov proti uporabniku se podatki na mobilni napravi dodelijo v obliki blokov. Vsaki mobilni napravi je lahko dodeljeno poljubno celo število blokov v frekvenčni domeni. Ker se dodeljevanje virov lahko spremeni ob vsakem prenosnem intervalu, mora dodeljevalni algoritem za vsako mobilno napravo upoštevati več dejavnikov, kot so: kvaliteta radijske povezave, interference, zahteve glede na QoS, prioritete storitev itd. Slika 3.8. prikazuje primer dodeljevanja podatkov različnih uporabnikov, čemur po navadi rečemo tudi časovno-frekvenčni multipleks.

Čeprav z uporabo OFDMA dosežemo visoko spektralno učinkovitost, pa za takšno rešitev potrebujemo zelo hitre procesorje in drage ojačevalce. Ta rešitev je zato primerna za bazne postaje, za mobilne pa je energijsko preveč potratna. Za mobilne postaje se zato uporablja SC-FDMA [6].



Slika 3.8.: Primer časovno-frekvenčnega multipleksa pri OFDMA.

3.4.1.2. SC-FDMA

V iskanju najboljše rešitve za prenos v smeri od uporabnika (ang. Uplink) so se avtorji standarda LTE izmed množice možnih rešitev odločili za SC-FDMA (ang. Single Carrier Frequency Division Multiple Access) s ciklično predpono. Enako kot pri FDMA se SC-FDMA uporablja v FDD in TDD načinu delovanja. Čeprav je OFDMA odlična rešitev za prenos v smeri proti uporabniku, za prenos v nasprotni smeri ni optimalna. Razlog za to so slabe lastnosti indeksa PAPR (ang. Peak-to-average Power Ratio) signala OFDMA, kar se odraža na slabši pokritosti s signalom od uporabnika. Karakteristike indeksa PAPR igrajo pomembno vlogo pri izdelavi cenovno učinkovitih mobilnih naprav.

Obstaja več možnih načinov generiranja signala SC-OFDMA. Za LTE je bil izbran DFT-s-OFDM (ang. DFT-spread-OFDM). Pri tem neko število modulacijskih simbolov z uporabo DFT enake dolžine pretvorimo v frekvenčni prostor. Rezultat se nato pošlje po prostih kanalih proti bazni postaji. Za modulacijo se uporabljajo QPSK, 16QAM in 64QAM, kjer je slednji na mobilni napravi podprt opcijsko. Tako kot pri OFDMA se tudi tu signalu dodaja ciklična predpona.

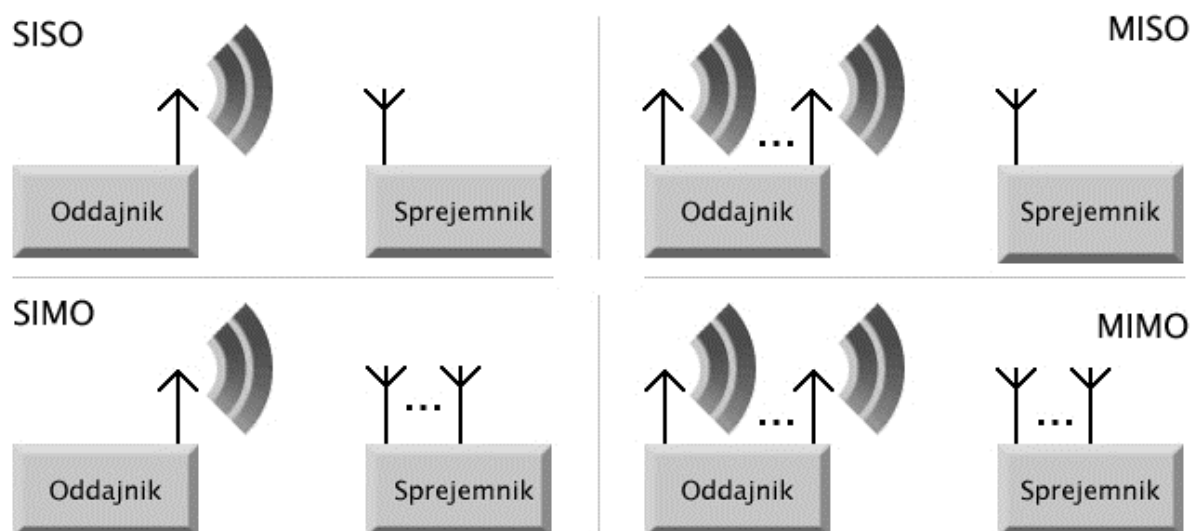
Razvrščanje virov pri komunikaciji od uporabnika se izvaja na bazni postaji. Ta vsaki mobilni napravi dodeli določene časovno-frekvenčne vire in o tem obvesti mobilno napravo. Bazna postaja tudi določi, kakšen naj bo format prenosa. Pri razvrščanju bazna postaja upošteva več

dejavnikov, kot so: parametri QoS, stanje izravnalnika mobilne naprave, kvaliteta povezave, zmogljivosti mobilne naprave itd. Podobno kot pri komunikaciji proti uporabniku se tudi v tej smeri za prenos mobilni napravi dodeli določeno število blokov. Interval med prenosi tudi tu znaša 1 ms. Velikost bloka za obe smeri komunikacije v frekvenčnem prostoru obsega 12 kanalov. Razlika je le v tem, da število blokov ni več poljubno. Zaradi uporabe DFT moramo uporabiti 2-, 3- ali 5-kratnik blokov. Podatki se prenašajo po tako imenovanem kanalu PUSCH (ang. Physical Uplink Shared Channel).

Glavna razlika med signaloma SC-FDMA in OFDMA je, da pri SC-FDMA vsak kanal, ki ga uporabimo za prenos signala, vsebuje informacijo o vseh modulacijskih simbolih. To dosežemo z uporabo transformacije DFT, ki vhodne podatke razširi na vse kanale, ki so na voljo. Pri OFDMA pa vsak kanal prenaša le informacije, ki se nanašajo na specifične modulirane simbole [6].

3.4.2. MIMO

Eden od glavnih ciljev LTE je povečanje zmogljivosti mobilnih omrežij. Veliko vlogo pri dosegu tega cilja igra uporaba sistema anten z več vhodi in več izhodi, ki se imenuje MIMO (ang. Multiple-Input and Multiple-Output). Slika 3.9. prikazuje vse možne kombinacije sistemov anten glede na njihovo število vhodov in izhodov. Vhod in izhod se v tem primeru nanašata na radijski kanal, ki prenaša signal, in ne na naprave z antenami. Glavni razlog za uporabo tega sistema, tako na strani oddajnikov kot sprejemnikov, je povečanje komunikacijskih zmogljivosti. Omogoča veliko večje prenose in večji doseg povezav, brez povečevanja pasovne širine in moči oddajanja. To dosežemo s porazdelitvijo celotne oddajne moči med vse razpoložljive antene. Obstajata dve metodi. S prostorskim multipleksiranjem (ang. Spatial multiplexing) povečamo spektralno učinkovitost, s prostorsko raznolikostjo (ang. Spatial diversity) pa povečamo zanesljivost radijske povezave. Spektralna učinkovitost v praksi pomeni prenesenih več bitov na sekundo na herc pasovne širine. Glede na kvaliteto radijske povezave lahko obe metodi tudi med seboj kombiniramo. Glede na število oddajnih in sprejemnih anten omogoča LTE konfiguraciji 2×2 (dve oddajni in dve sprejemni anteni), 4×2 in 4×4 . Predvsem na strani mobilnih naprav bo po vsej verjetnosti omogočen tudi sistem s samo eno anteno.

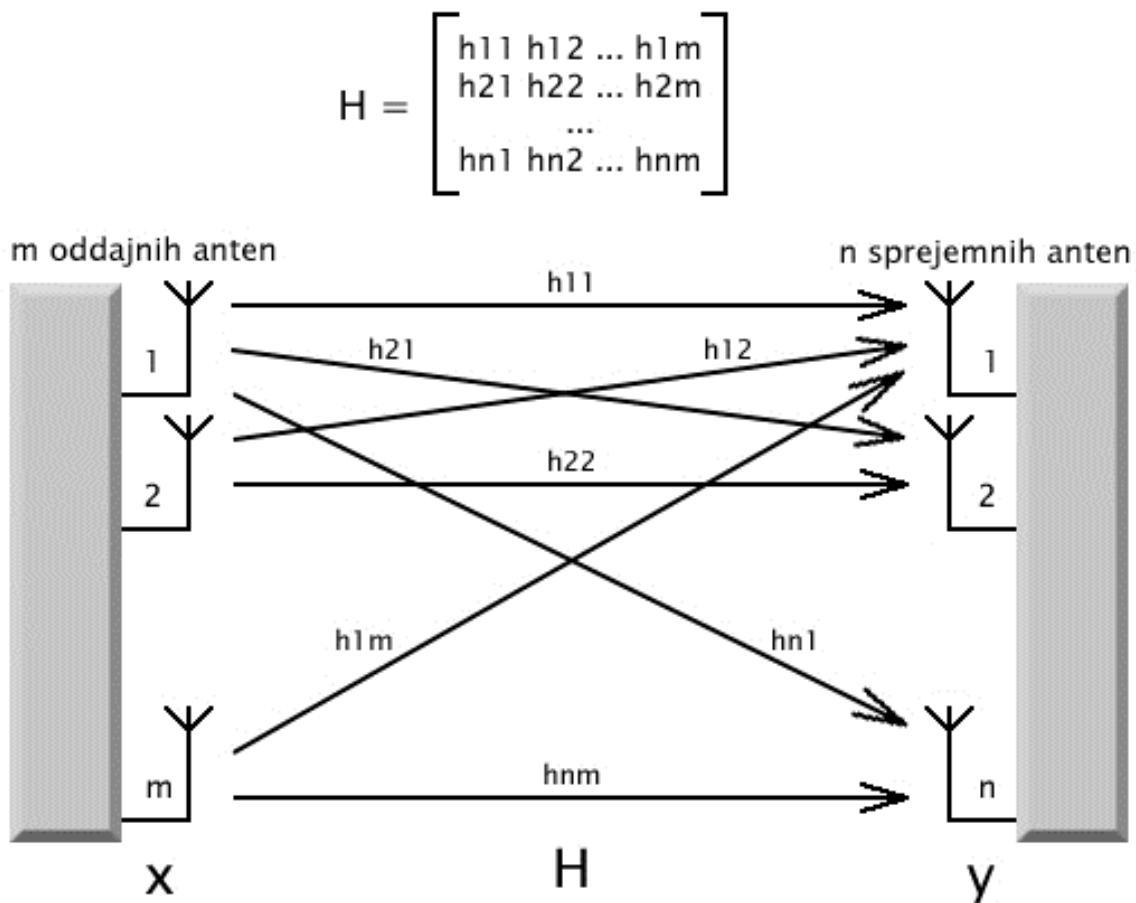


Slika 3.9.: Možne kombinacije antenskih sistemov z več vhodi in več izhodi.

Pri sistemu MIMO število oddajnih in število sprejemnih anten ni nujno enako. Zaradi uporabe istega kanala vsaka antena poleg njej namenjenih signalov prejme tudi signale, namenjene drugim antenam. Takšen sistem prikazuje Slika 3.10. V matriki povezav za m oddajnih in n sprejemnih anten, je direktna povezava med oddajno in sprejemno anteno predstavljena s h_{11} , h_{22} itd. Indirektne povezave pa so predstavljene s h_{21} , h_{n1} itd. Te povezave tvorijo tako imenovano prenosno matriko H dimenzije $n \times m$. Z oddanim vektorjem x , prejetim vektorjem y in šumom n dobimo prenosno formulo:

$$y = H * x + n \quad (3.1.)$$

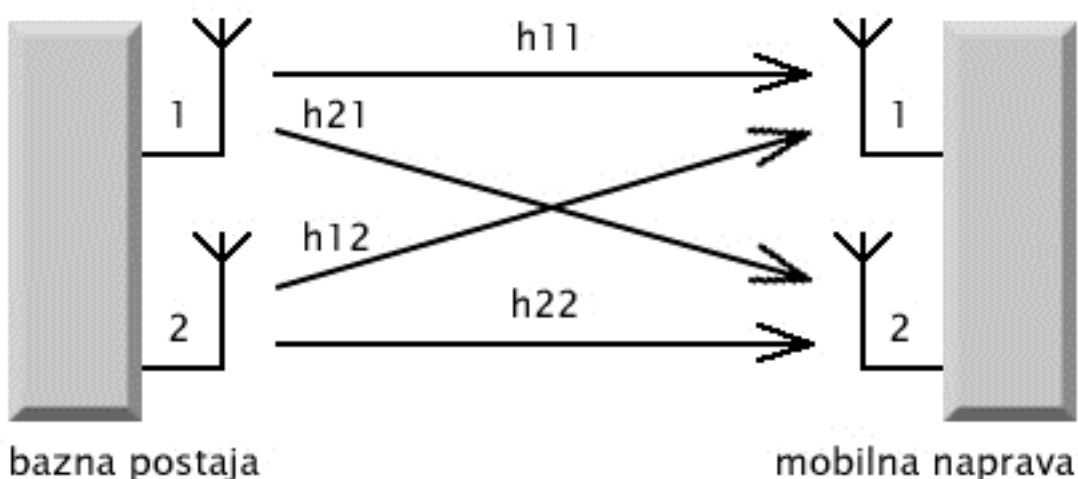
Podatki, ki jih pošiljamo, so razdeljeni po neodvisnih podatkovnih tokovih, katerih število je vedno manjše ali enako številu anten. V primeru, da imamo različno število oddajnih in sprejemnih anten, je število tokov enako manjšemu od obeh števil. V primeru, da imamo sistem 4×4 , lahko uporabljamo največ štiri tokove. Pri sistemu 3×2 pa največ dva. Kapaciteta prenosa podatkov teoretično narašča linearno s številom tokov [7].



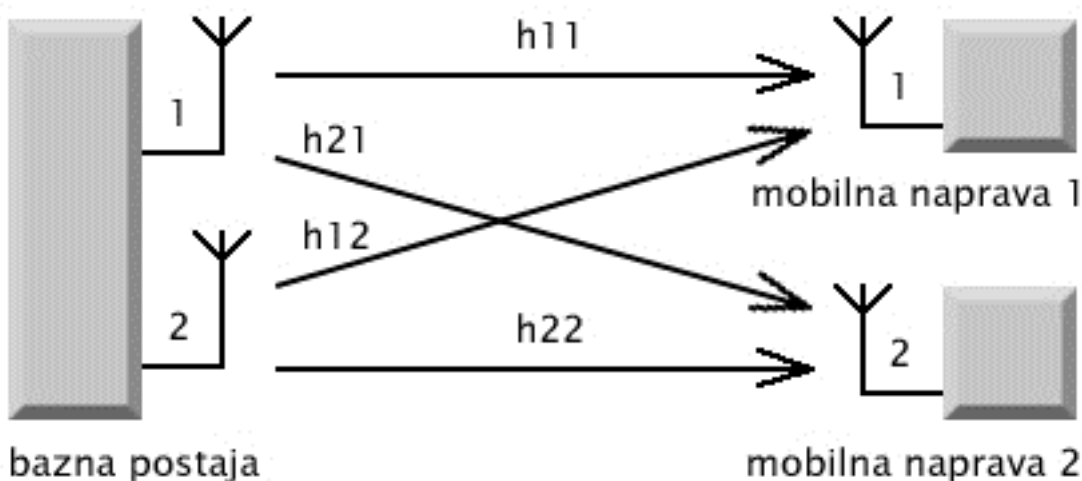
Slika 3.10.: Sprejemanje in oddajanje signalov pri uporabi več anten.

Glede na način upravljanja s tokovi MIMO podpira dva načina delovanja. Načinu, pri katerem želimo prenos podatkov povečati le neki individualni mobilni napravi, pravimo SU-MIMO (ang. Single User MIMO). Kadar pa so določeni tokovi dodeljeni več uporabnikom, MIMO deluje v načinu MU-MIMO (ang. Multi User MIMO). Slednji se uporablja predvsem za komunikacijo od uporabnika, saj na strani mobilne naprave uporablja le eno oddajno anteno in s tem močno zmanjša kompleksnost oddajanja na strani mobilne naprave. Temu načinu pravimo tudi sodelovalni (ang. Collaborative) MIMO. Oba načina sta prikazana na spodnji sliki.

Enouporabniški MIMO (SU-MIMO)



Večuporabniški MIMO (MU-MIMO)



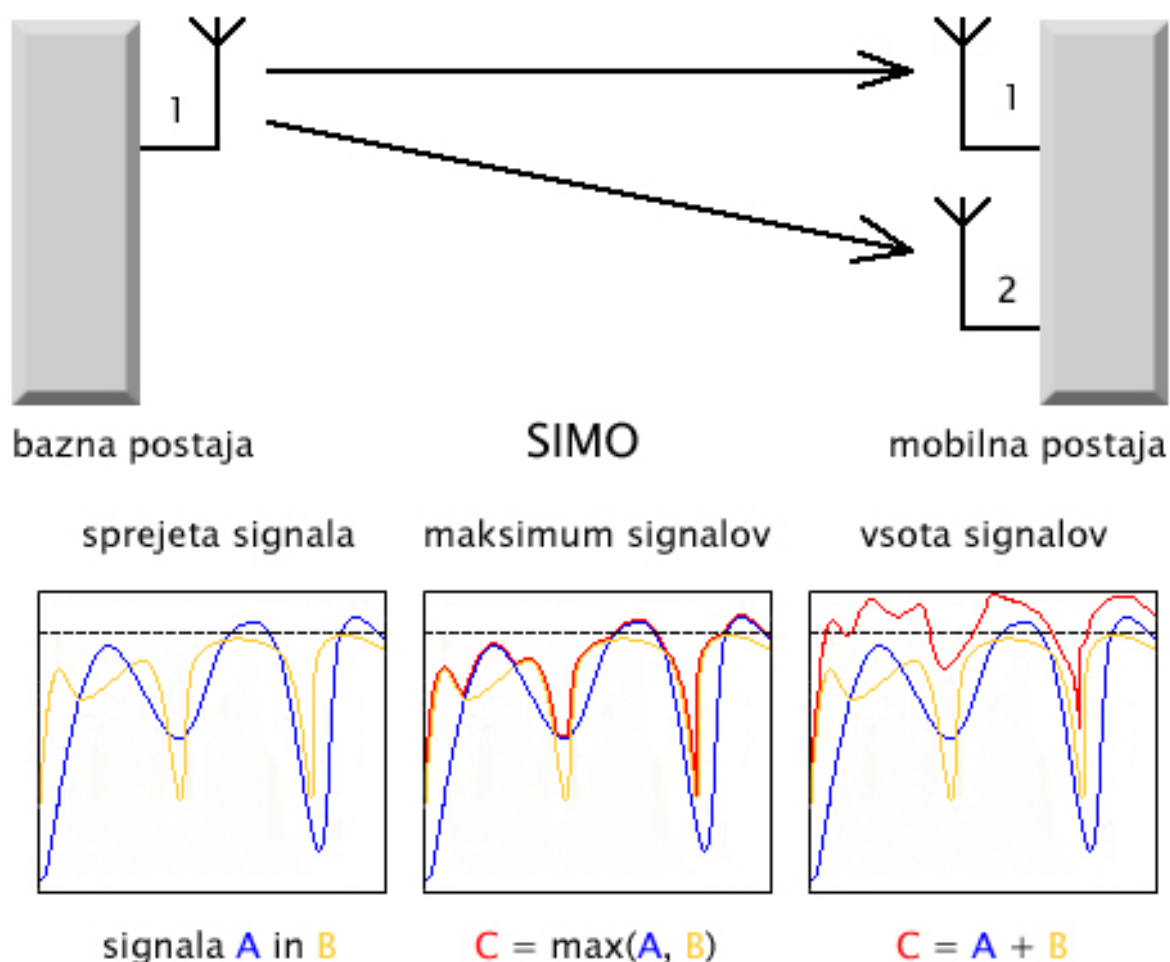
Slika 3.11.: Enouporabniški in večuporabniški sistem anten MIMO.

3.4.2.1. Prostorska raznolikost

Kot že rečeno, prostorska raznolikost nima vpliva na hitrost prenosa podatkov, temveč na robustnost radijske povezave. Pri tem načinu gre za oddajanje istih podatkov po več različnih poteh. Prostorsko raznolikost delimo na sprejemno in oddajno.

Pri sprejemni raznolikosti (ang. RX Diversity) imamo na strani sprejemnika več anten kot na strani oddajnika. Najbolj enostaven primer je z dvema sprejemnima in eno oddajno anteno ali tako imenovani SIMO 1x2 (ang. Single Input Multiple Output). Zaradi različnih poti signalov sprejemnik zazna dva zbledela signala. Poznamo dve metodi, s katerima lahko v

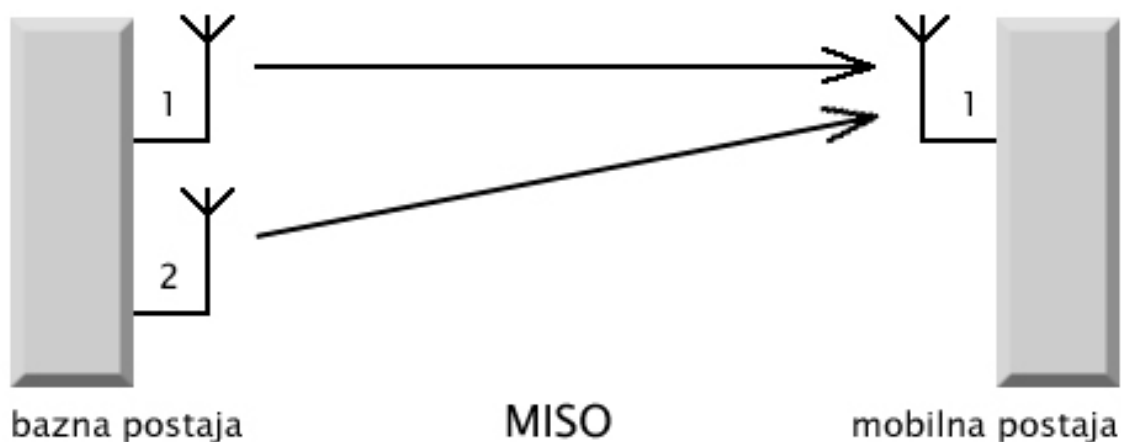
takšnem primeru na strani sprejemnika močno zmanjšamo razmerje signala proti šumu (ang. Signal-to-noise ratio). Metoda, ki vedno izbere najmočnejši signal, se imenuje preklopljena raznolikost (ang. Switched diversity). Združeno maksimalno razmerje (ang. Maximum Ratio Combining) pa interpretira signal, ki ga dobi z vsoto vseh prejetih signalov. Prednost tega sistema je, da je enostaven za implementacijo. Prikazan je na Slika 3.12.



Slika 3.12.: Obravnavanje raznolikosti sprejetega signala.

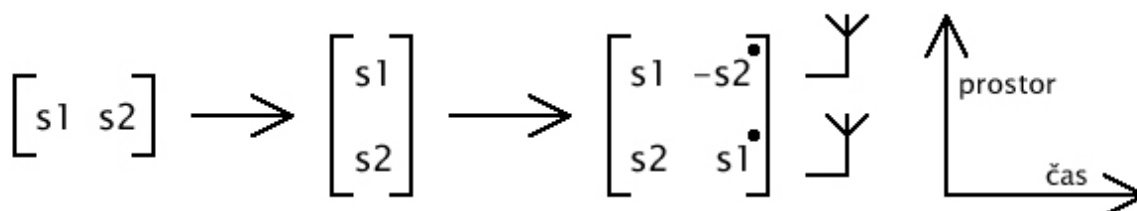
V primeru oddajne raznolikosti (ang. TX Diversity) imamo več oddajnih kot sprejemnih anten. Enostaven primer takšnega sistema je MISO 2x1 (ang. Multiple Input Single Output), ki je prikazan na Slika 3.13. Oddajnik redundantno oddaja iste podatke na več antenah hkrati. Prednost tega sistema je, da je redundanca na strani bazne postaje, kjer jo je enostavneje in ceneje implementirati, kot na strani UE. Redundantni signali se generirajo s pomočjo prostorsko-časovnih Alamoutijevih kod, ki jih je prvi razvil za primer z dvema antenama.

Poleg tega da se kopije signala oddajajo iz različnih anten, se oddajajo tudi v različnem času. Temu pravimo zakasnjena raznolikost (ang. Delayed diversity).



Slika 3.13.: Antenski sistem MISO 2x1.

Alamoutijeve časovno-prostorske kode so sestavljene iz prostorskih in začasnih kopij signala, kot kaže Slika 3.14. Dobimo jih z multipleksiranjem signalov s_1 in s_2 , katerima dodamo kopijo signala. Obstajajo tudi psevdo-Alamoutijeve kode za sisteme z več antenami.

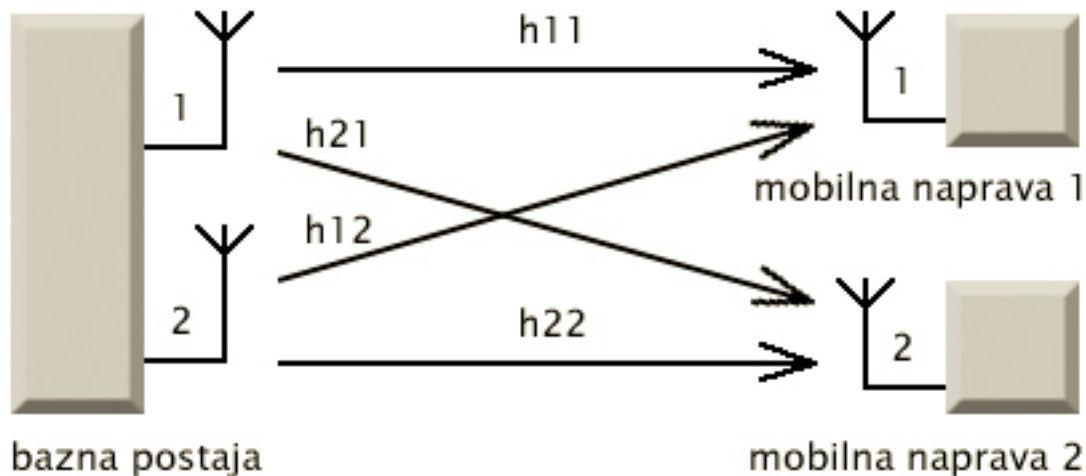


Slika 3.14.: Način izračunavanja Alamoutijeve časovno-prostorske kode.

3.4.2.2. Prostorsko multipleksiranje

V primerjavi s prostorsko raznolikostjo je prostorsko multipleksiranje namenjeno povečanju količine prenesenih podatkov. Podatki so razdeljeni v ločene tokove, vsak tok pa se neodvisno oddaja iz ločenih anten. Ker MIMO oddaja prek enega in istega kanala, lahko pride

do medsebojnih vplivov križnih povezav. Ta problem lahko odpravimo na dva načina. Z matriko H sprejemnik lahko izračuna križne povezave. Pri metodi z odprto zanko (ang. Open-loop) si pomagamo z dodatnimi informacijami v oddanem signalu. Pri metodi z zaprto zanko (ang. Closed-loop) pa sprejemnik sporoči stanje kanala prek dodatnega odzivnega kanala. Na Slika 3.15. je prikazan sistem MIMO 2x2.



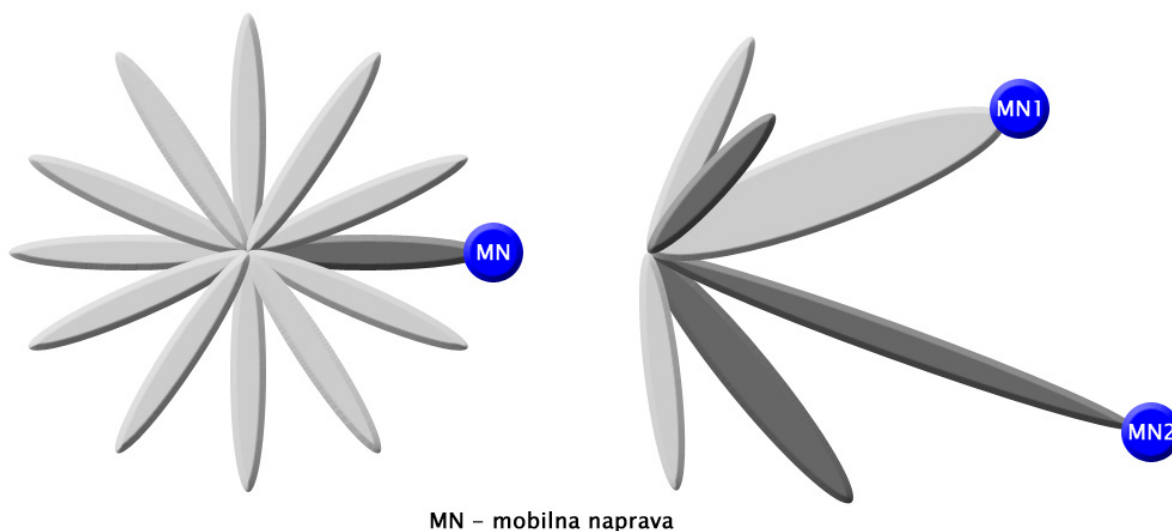
$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}$$

Slika 3.15.: Sistem anten MIMO 2x2.

3.4.2.3. Oblikovanje snopa

Antene močno vplivajo na kapacitete omrežja. Z uporabo sektorskih anten s kotom 120 stopinj je bila kapaciteta omrežij GSM potrojena. Prilagodljive (ang. Adaptive) antene z ozkimi snopi povečajo intenziteto prostorskega multipleksiranja. Pametne antene (ang. Smart Antenna System) spadajo v vrsto prilagodljivih anten, vendar se razlikujejo po sposobnosti ocene smeri prihoda DoA (ang. Direction of Arrival). Sposobne so tudi ustvariti poljubno obliko snopa. Oblikovanje snopa (ang. Beamforming) pomeni ustvarjanje poljubnih vzorcev radiacije anten oziroma poljubnega področja pokritosti s signalom. V sistemih MIMO se uporabljajo pametne antene, ki jih delimo v dve različni skupini: oblikovanje snopa s preklapljanjem (ang. Switched beamforming) in prilagodljivo oblikovanje snopa (ang. Adaptive beamforming).

Pri oblikovanju snopa s preklapljanjem imamo na voljo končno fiksno število vnaprej nastavljenih vzorcev snopov. Tak sistem izračuna smer prihoda in na podlagi tega vključi določen fiksni snop. Uporabnik ima optimalno moč signala le vzdolž centra snopa. Sistemi s prilagodljivim oblikovanjem snopa ta problem odpravijo s prilagajanjem snopa v realnem času glede na gibanje mobilne naprave. Kompleksnost in cena takšnih antenskih sistemov je zato višja. Opisana sistema sta prikazana na spodnji sliki.



Slika 3.16.: Oblikovanje snopa s preklapljanjem in prilagodljivo oblikovanje snopa.

3.4.3. Samoorganizirano omrežje

Za dolgotrajno in zanesljivo delovanje vsak sistem zahteva vzdrževanje. To še posebej velja za tako zahtevne sisteme, kot je omrežje LTE. Zaradi svoje kompleksnosti je omrežje LTE v tem pogledu postavilo povsem nove zahteve. Eden od pomembnih ciljev snovalcev standarda v okviru projekta 3GPP je tudi poenostavitev in pocenitev upravljanja in vzdrževanja omrežja. Za dosego tega cilja mora omrežje biti sposobno avtokonfiguracije in avtooptimizacije. Takšnim omrežjem pravimo samoorganizirana omrežja ali krajše SON (ang. Self-Organizing Networks).

Glavni vzroki za razvoj samoorganiziranih omrežij so:

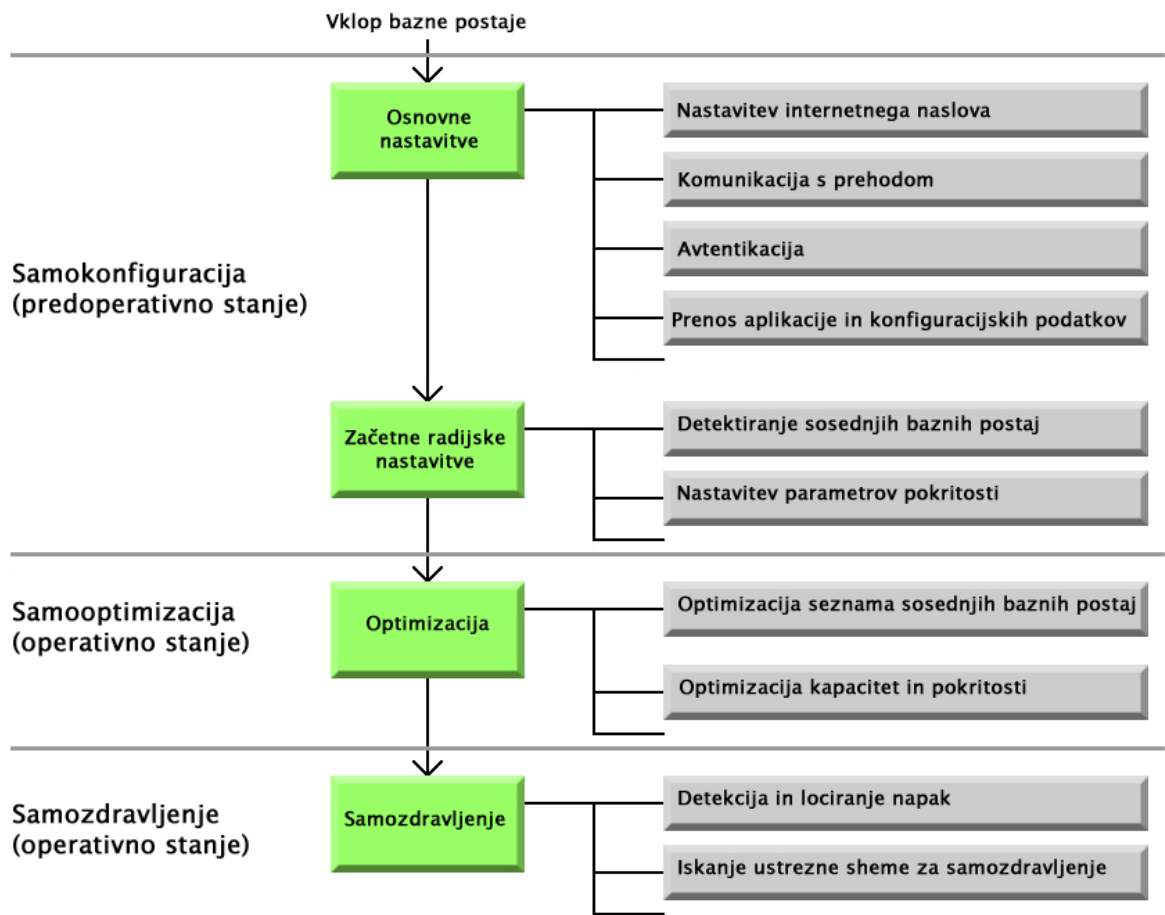
- naraščajoče število in kompleksnost struktur omrežnih parametrov,
- sočasno delovanje različnih omrežnih infrastruktur, kot so 2G, 3G in EPC (LTE),
- hitro naraščajoče število baznih postaj, ki zahteva avtomatizacijo konfiguracije in upravljanja s čim manjšo interakcijo upravljavcev in vzdrževalcev omrežij.

Cilj omrežij SON je avtomatizacija konfiguracije in optimizacije omrežij brez oziroma s čim manj človeške interakcije.

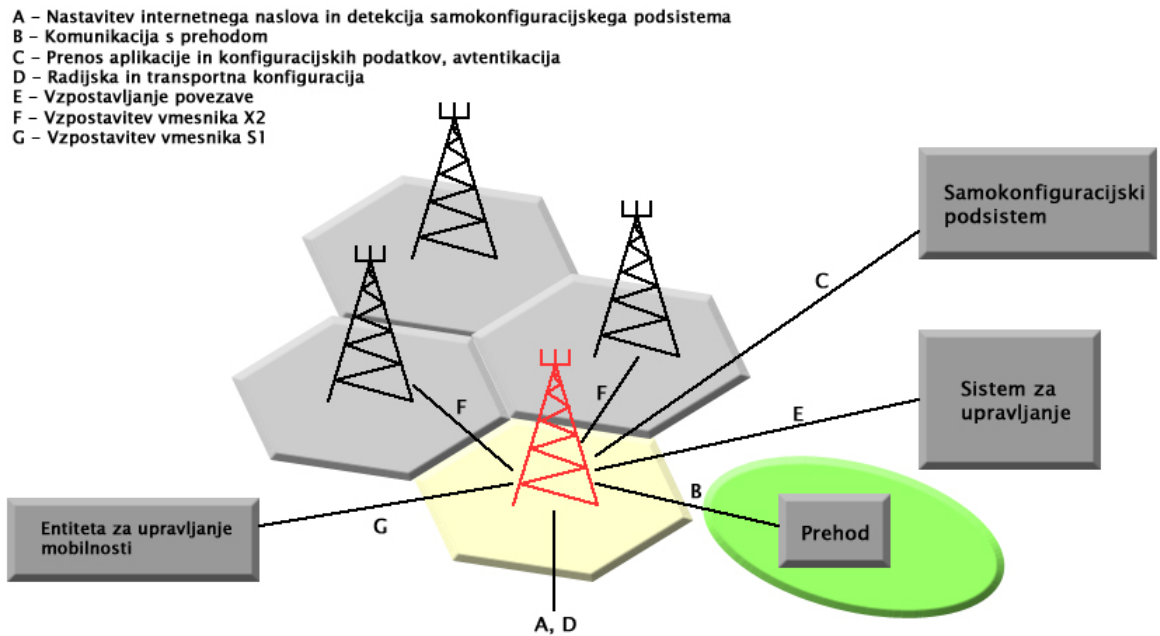
3.4.3.1. Funkcionalnosti omrežja SON

Glavne funkcionalnosti omrežij SON so prikazane na Slika 3.17. in so razdeljene na tri dele:

- **samokonfiguracija:** je postopek inicializacije po namestitvi v omrežje in vklopu bazne postaje. Izvede se takoj po priklopu na električno omrežje in se konča, preden bazna postaja preide v operativno stanje. Bazna postaja je v operativnem stanju šele po vklopu radijskega oddajnika. Ob vklopu je priključena na fiksno omrežje, prek katerega črpa ustrezne konfiguracijske parametre. Samokonfiguracija poteka avtomatično brez posredovanja vzdrževalcev in predstavlja konfiguracijo bazne postaje, ki je primerna za njeno osnovno delovanje. Sestavljena je iz dveh korakov, ki ju predstavljajo osnovne nastavitve in začetna konfiguracija radijskega oddajnika. Celoten potek samokonfiguracije je prikazan na Slika 3.18.
- **samooptimizacija:** poteka v operativnem stanju bazne postaje. V tem koraku se izvajajo meritve zmogljivosti in preostale meritve med mobilno in bazno postajo. Cilj samooptimizacije je fina nastavitve parametrov, ki pripomorejo k optimalnemu delovanju omrežja. Pri optimizaciji si bazna postaja pomaga z zunanjimi orodji, dostopnimi prek fiksnega omrežja. Primer samooptimizacije je iskanje najboljših sosednjih baznih postaj.
- **samozdravljenje:** namen te funkcionalnosti so avtomatska detekcija, lociranje in odpravljanje napak, ki se pojavijo v omrežju ali na bazni postaji. Nanaša se na določene razrede napak, ki jih je možno avtomatično odpraviti. Cilj načrtovalcev je, da bi bilo teh razredov čim več, saj bi se le tako lahko večino časa sistemi vzdrževali sami.



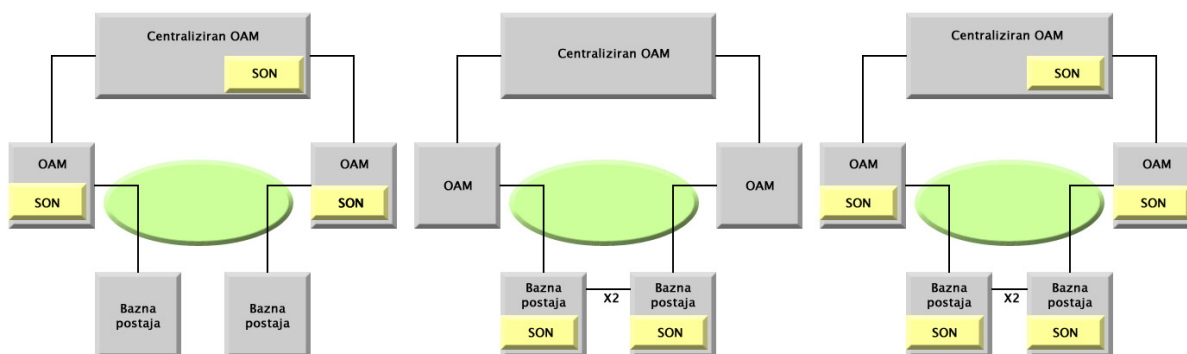
Slika 3.17.: Glavne funkcionalnosti samoorganiziranega omrežja.



Slika 3.18.: Koraki pri samokonfiguraciji omrežja.

3.4.3.2. Arhitektura omrežja SON

Samokonfiguracija baznih postaj se izvaja s samokonfiguracijskim podsistemom, ki je del sistema za upravljanje OAM (ang. Operations and Management). Podsistem za samooptimizacijo pa se lahko nahaja na bazni postaji, na sistemu za upravljanje ali na obeh, kot je prikazano na Slika 3.19. [10].



Slika 3.19.: Centralizirano, distribuirano in hibridno samoorganizirano omrežje.

Glede na lokacijo optimizacijskih algoritmov tako ločimo tri različne vrste omrežij SON:

- **centraliziran SON:** vsi optimizacijski algoritmi se nahajajo in izvajajo znotraj sistema OAM. Prednost takega načina distribucije je enostavno posodabljanje sistema. Ker pa imajo različni proizvajalci lahko različne sisteme OAM, se med njimi pojavi problem podpore različnih optimizacijskih funkcij,
- **distribuiran SON:** pri tem načinu distribucije sistema SON se vsi optimizacijski algoritmi nahajajo in izvajajo na baznih postajah. Problem nastane pri posodabljanju programske opreme, saj je treba posodobiti vsako bazno postajo posebej. Takšnega sistema ne moremo uporabiti v omrežjih s kompleksnimi optimizacijskimi zahtevami, kjer je potrebna koordinacija med velikim številom baznih postaj. Uporabljamo ga za sisteme z majhnim številom baznih postaj ali v primeru reševanja optimizacijskih problemov, ki se nanašajo na majhno število baznih postaj,
- **hibridni SON:** v primerjavi s centraliziranim in distribuiranim omrežjem SON na hibridnem omrežju nekateri optimizacijski algoritmi tečejo na bazni postaji, drugi pa na sistemu OAM. Enostavne in hitre optimizacije se izvajajo na bazni postaji, kompleksne pa na OAM. Takšen sistem je zelo fleksibilen z vidika možnosti reševanja različno zahtevnih optimizacijskih problemov. Slaba stran takšnega sistema je zamudno nameščanje in posodabljanje programske opreme.

Poglavje 4

4. LTE v Sloveniji

Slovenija uspešno sledi razvoju mobilnih tehnologij. Prvo komercialno omrežje tretje generacije smo dobili leta 2003. Do leta 2010 je bilo v celoti nadgrajeno s HSDPA in HSUPA, nato pa še s HSPA+, ki predstavlja zadnje možno nadgradnjo omrežij UMTS. Podjetje Si.mobil je julija 2012 postavilo prvo omrežje LTE pri nas.

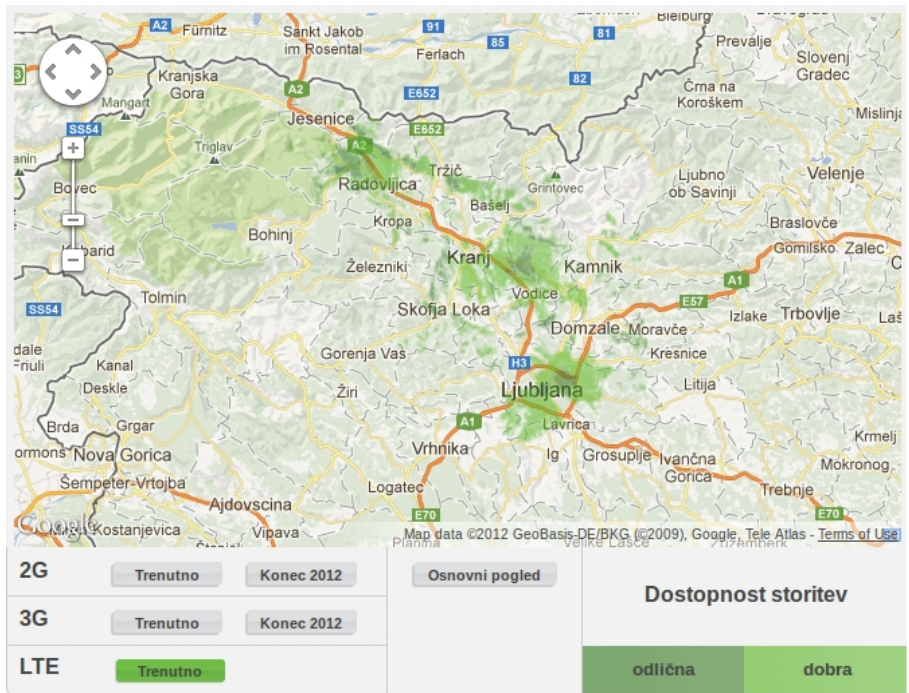
Frekvenčni spekter predstavlja omejeno naravno dobrino vsake države. Agencije različnim brezžičnim tehnologijam podelijo ustrezne frekvenčne pasove glede na cilje in razvojne usmeritve določene države. V Sloveniji je to APEK, Agencija za pošto in elektronske komunikacije Republike Slovenije. Čeprav standard LTE predvideva delovanje na različnih frekvencah, se trenutno za mobilna omrežja LTE v Sloveniji uporablja le frekvenca 1800 MHz. Pravi razmah omrežij LTE v Sloveniji in tudi v Evropi je lahko pričakovati s sprostitvijo frekvence 800 MHz, ki je bila do zdaj uporabljena za analogno televizijo. Ker analogne televizije še nismo popolnoma ukinili, lahko sprostitvev te frekvence pričakujemo nekje do leta 2014.

4.1. Si.mobil

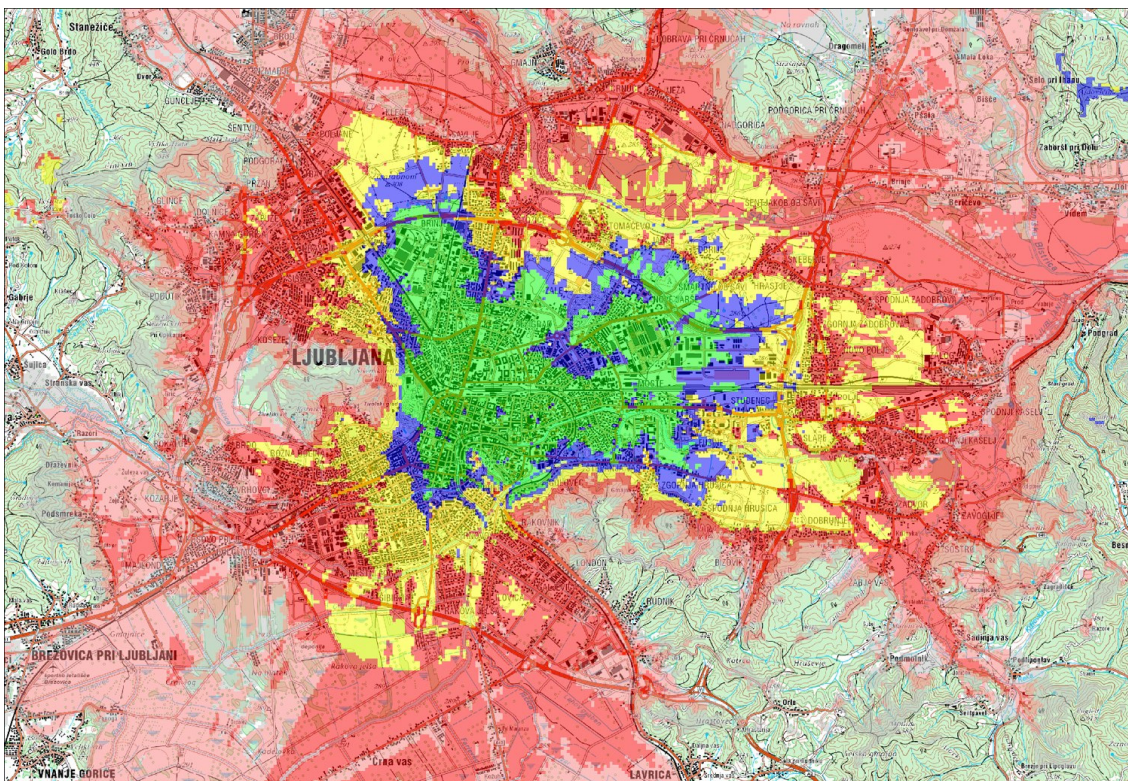
15. julija 2012 je podjetje Si.mobil predstavilo prvo komercialno omrežje LTE v Sloveniji. Predstavlja prvi resen korak uporabe mobilnih omrežij četrte generacije pri nas. Predstavitve delovanja omrežja je potekala na brniškem letališču, kjer so izmerili prenose do 80 mbit/s v smeri proti uporabniku in do 20 mbit/s v smeri od uporabnika z odzivnim časom omrežja okoli 15 ms. Čeprav so te hitrosti nižje od teoretičnih zmogljivosti, ki znašajo do 100 mbit/s v smeri proti uporabniku in do 50 mbit/s v smeri od uporabnika, so to še vedno nekajkrat višje hitrosti, kot jih trenutno pri nas dopuščajo najhitrejša omrežja HSPA+. Poleg tega so nekaj nižje hitrosti pričakovane, saj je bil na predstavitvi za omrežje LTE na voljo le frekvenčni pas velikosti 15 MHz, kar je premalo za doseganje optimalnih hitrosti prenosa.

Dostop do omrežja LTE je poleg na Brniku trenutno na voljo še v okolici Bleda in ponekod v Ljubljani. Na Bledu je na voljo frekvenčni pas velikosti 10 MHz, v Ljubljani pa 5 MHz. Na Slika 4.1. je z zeleno barvo prikazana trenutna pokritost področja s signalom LTE v Sloveniji, na Slika 4.2. pa podroben prikaz pokritosti v Ljubljani. Zelena, modra, rumena in rdeča

barva po vrsti predstavljajo dostopnost omrežja globoko v stavbi, v stavbi, v avtu in na prostem [4].



Slika 4.1.: Pokritost Slovenije s signalom LTE [9].



Slika 4.2.: Pokritost Ljubljane s signalom LTE [9].

4.2. Telekom Slovenije

Telekom Slovenije trenutno še nima delujočega komercialnega omrežja LTE. Čeprav opremo preizkušajo že od leta 2010, bodo predvidoma omrežje LTE ponudili uporabnikom na začetku leta 2013. Do konca leta 2012 naj bi na Telekomu Slovenije delovalo 70 baznih postaj LTE. Ob zagonu naj bi omrežje pokrivalo vsa večja slovenska mesta, pozneje pa bodo pokritost postopoma širili [2].

4.3. Praktični preizkus omrežja LTE

Kljub temu da je omrežje LTE v Sloveniji že dostopno, je njegova uporaba žal še zelo omejena. Trenutno se do omrežja še ne da dostopati direktno z mobilnim telefonom, kot sta Apple iPhone 5 ali Samsung Galaxy S III. Problem je v tem, da je postopek za aktiviranje uporabe omrežja LTE dokaj zapleten. Na pobudo operaterja proizvajalec najprej preveri zmožnosti njegovega omrežja in šele po tem pri večjih posodobitvah naprav programsko omogoči mobilnim napravam dostop do tega omrežja. Podjetje Si.mobil trenutno takšne posodobitve še nima, na srečo pa obstaja tudi druga možnost.



Slika 4.3.: Modem USB E392 podjetja Huawei.

Podjetje Si.mobil, trenutno edini ponudnik komercialnega dostopa do omrežja LTE, uporabnikom omogoča dostop s pomočjo modema USB Huawei E392. Poleg modema uporabnik

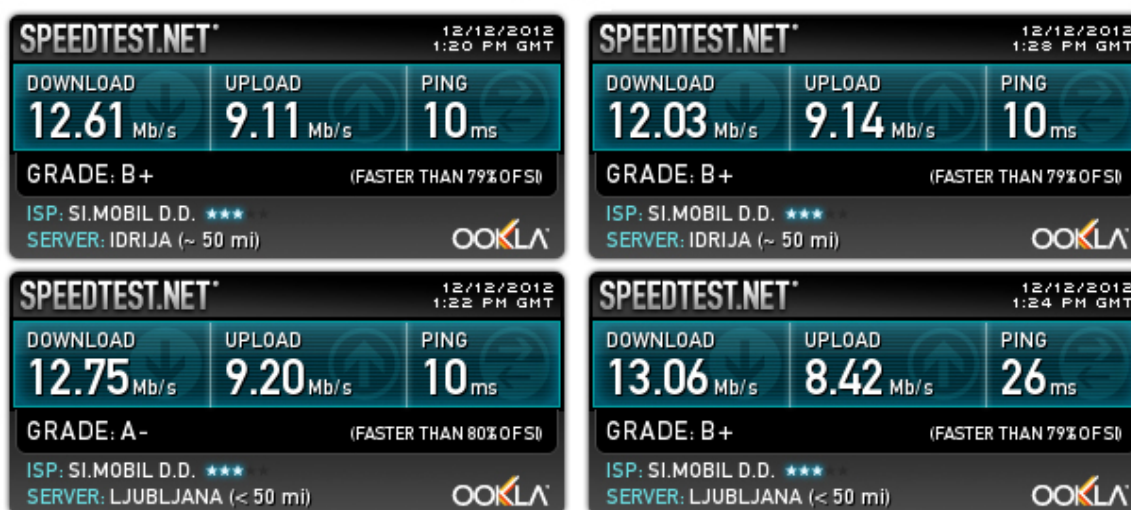
dobi posebno kartico SIM, prek katere je omrežje LTE dosegljivo. Modem je prikazan na Slika 4.3. Čeprav nam modem omogoča dostop do omrežja, trenutno omogoča samo prenos podatkov. Prenos govora VoLTE (ang. Voice over LTE) še ne deluje.

GSM/EDGE			UMTS/HSPA		
Ljubljana			Hosted by: freeNET d.o.o.		
PING	DOWNLOAD	UPLOAD	PING	DOWNLOAD	UPLOAD
377ms	18.4kB/s	15.9kB/s	109ms	389.0kB/s	200.6kB/s
Ljubljana			Idrija		
PING	DOWNLOAD	UPLOAD	PING	DOWNLOAD	UPLOAD
382ms	18.9kB/s	15.0kB/s	92ms	402.7kB/s	177.2kB/s

Slika 4.4.: Rezultati preizkusa omrežij GSM/EDGE in UMTS/HSPA.

Glede na trenutne zmožnosti so preizkusi omejeni na hitrost prenosa podatkov in velikost zakasnitve. Zmogljivosti omrežja LTE, ki so predpisane v standardu, so v praksi praktično nedosegljive, kar je posledica več dejavnikov. Testno omrežje trenutno deluje na 1800 MHz. Za LTE je optimalna frekvenca 800 MHz, ki pa trenutno za to omrežje v Sloveniji še ni na voljo.

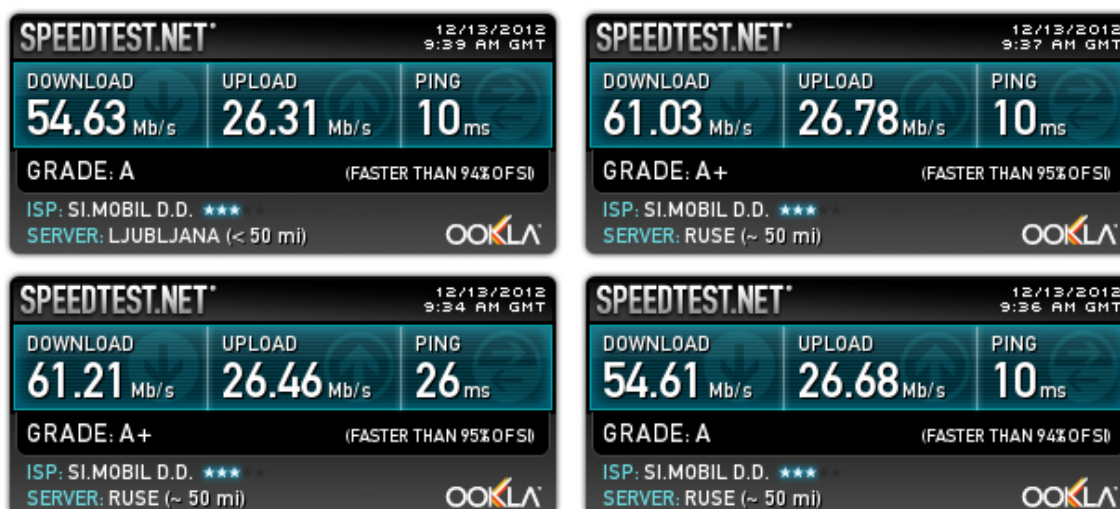
LTE – Ljubljana, BTC



Slika 4.5.: Rezultati preizkusa omrežja LTE v Ljubljani.

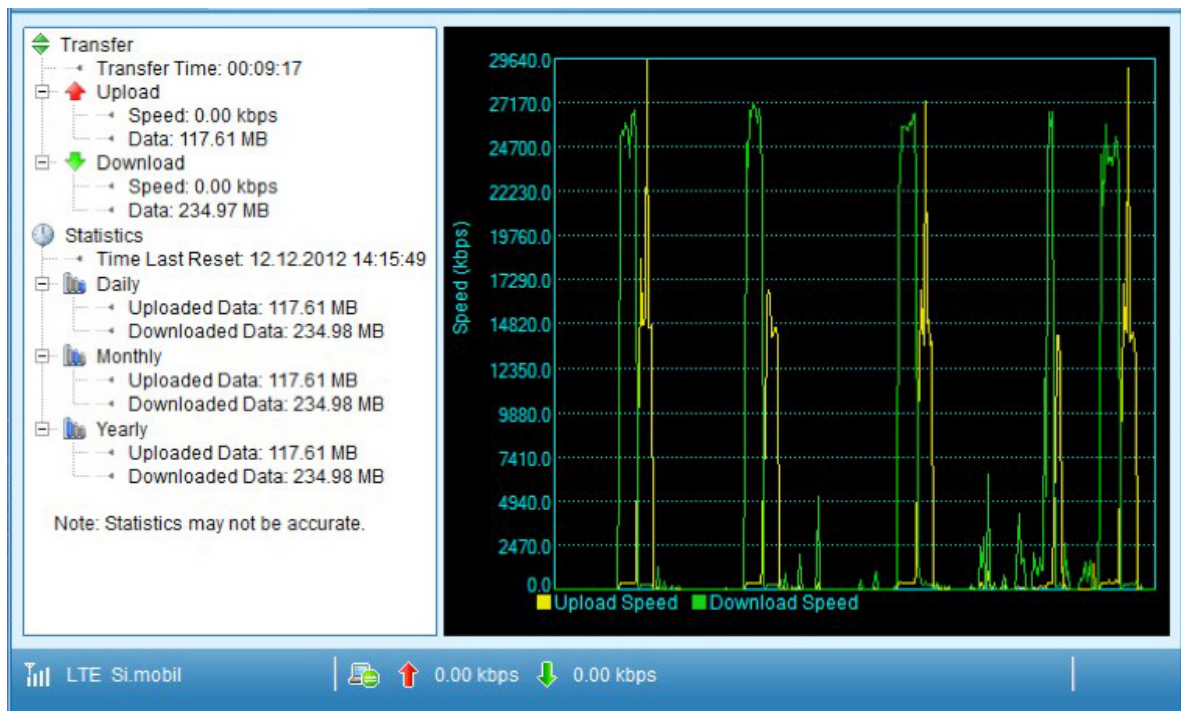
Na vseh treh lokacijah v Sloveniji je na voljo pas 5, 10 ali 15 MHz, optimalen pa bi bil 20 MHz. Poleg tega moramo upoštevati še interference, odboje, mikro lokacijo in zasedenost omrežja. Slednje trenutno ni problematično, ker je uporabnikov še zelo malo. Za primerjavo rezultatov so na Slika 4.4. prikazani rezultati preizkusa omrežij GSM/EDGE in UMTS/HSPA. Preizkus omrežja LTE je bil izveden v Ljubljani, v nakupovalnem centru BTC in na letališču Brnik. Rezultati so prikazani na Slika 4.5 in Slika 4.6. Čeprav so izmerjene hitrosti omrežja LTE skoraj osemkrat nižje od pričakovanih 100 mbit/s, je razlika v hitrosti v primerjavi z GSM/EDGE in UMTS/HSPA še vedno zelo velika. Iz preizkusov je razvidno, da je odzivni čas omrežja LTE od deset- do tridesetkrat manjši. Hitrost prenosa podatkov pa približno 84-krat hitrejša od GSM/EDGE in štirikrat hitrejša od UMTS/HSPA. Očitna je tudi razlika v hitrosti prenosov v Ljubljani in na Brniku, kjer je omrežje LTE približno štirikrat hitrejše. Vzrok za to je razlika v razpoložljivi pasovni širini, ki je v Ljubljani 5 MHz, na Brniku pa 15 MHz.

LTE – Brnik

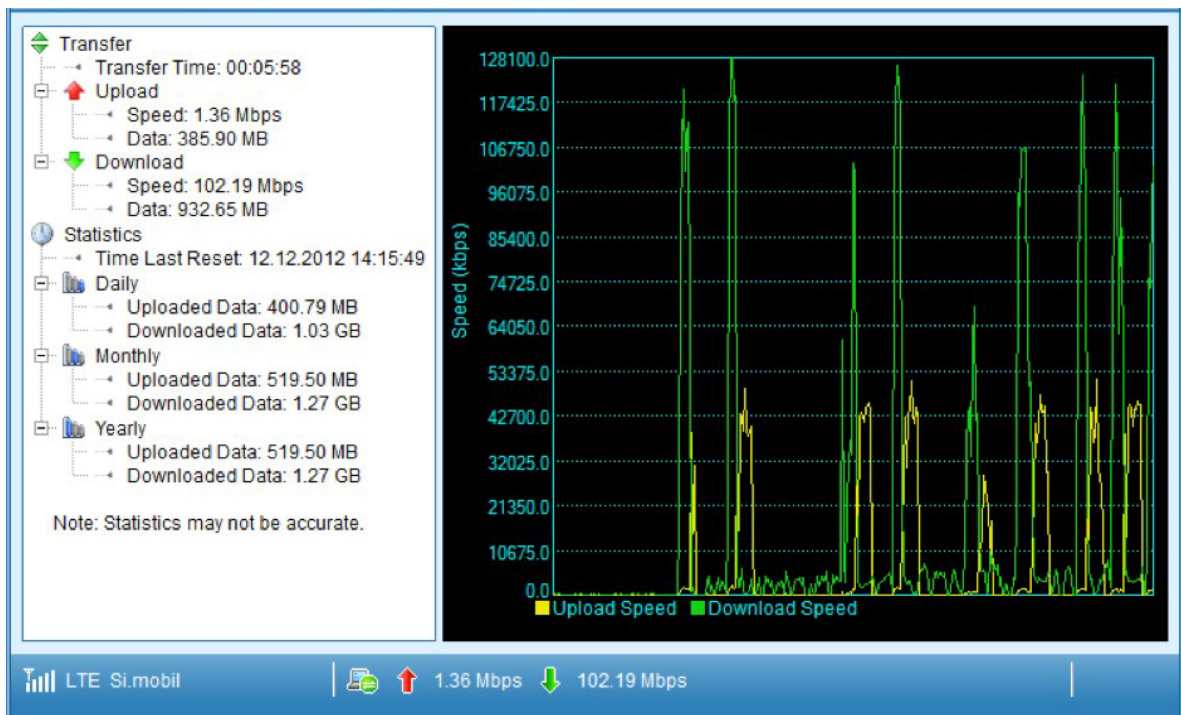


Slika 4.6.: Rezultati preizkusa omrežja LTE na letališču Brnik.

Poleg same trenutne hitrosti omrežja je zelo pomembna tudi stabilnost same povezave v daljših časovnih intervalih. To je pomembno predvsem pri prenašanju večjih količin podatkov, kot so na primer prenos videa visoke ločljivosti, prenos zvoka, prenos velikih datotek ipd. Slika 4.7. prikazuje rezultate hitrosti prenosa večje datoteke preko omrežja LTE v nakupovalnem centru BTC v Ljubljani. Zelena krivulja predstavlja hitrost prenosa datoteke velikosti 235 MB v smeri k uporabniku. Rumena krivulja pa predstavlja hitrost prenosa datoteke velikosti 117 MB v smeri od uporabnika. Podoben preizkus z datotekama velikosti 1030 MB in 400 MB v omrežju LTE na Brniku je prikazan na Slika 4.8.



Slika 4.7.: Preizkus prenosa večje datoteke preko omrežja LTE v Ljubljani.



Slika 4.8.: Preizkus prenosa večje datoteke preko omrežja LTE na Brniku.

Poglavje 5

5. Sklepne ugotovitve

V diplomskem delu so opisane nekatere najpomembnejše tehnologije standarda mobilnega omrežja četrte generacije, imenovanega LTE. Ker je standard razmeroma nov, je za lažjo predstavo na začetku podana kratka zgodovina razvoja mobilnih omrežij od prvih generacij do generacij, ki šele prihajajo. Razvrščena so po letih njihove uporabe in tehnologijah, na katerih temeljijo.

Mobilna omrežja so z vsako novo generacijo uporabnikom vedno ponudila uporabo novih, prej še neznanih ali premalo razvitih tehnologij. S tem se je tudi močno povečala uporaba in uporabnost mobilnih naprav. Vsaka tehnologija je po svoje vplivala na izboljšave določenega omrežja. Nekatere so omogočile boljšo mobilnost, druge večji doseg signala itd.

Standard za mobilno omrežje LTE je bil napisan z namenom postavitve novih, veliko višjih zahtev po zmogljivostih v primerjavi z omrežji tretje generacije. Izpolnjevanje teh zahtev pa so omogočile tudi v tem diplomskem delu opisane tehnologije, kot so digitalni modulaciji OFDMA in SC-FDMA, sistem anten MIMO, samoorganizirana omrežja ipd. Podobnih tehnologij je v omrežju LTE še veliko več, vendar bi bil z obravnavo vseh presežen obseg tega dela. Opisana je tudi osnovna arhitektura omrežja. V standardu so ji posvetili zelo veliko pozornost in je predstavljena z velikim številom obširnih in podrobnih dokumentov, zato se je bilo na tem mestu treba omejiti na osnovne elemente omrežja.

Mobilni standardi predstavljajo teoretično osnovo, iz katere izhajajo proizvajalci mobilne opreme. Ti morajo upoštevati predpisano arhitekturo in način delovanja omrežja ter poskrbeti, da njihovo omrežje tudi z vidika zmogljivosti zadošča zahtevam standarda. Od prvega pojava mobilnih omrežij LTE so se ta počasi, a vztrajno razvijala. Največji proizvajalci mobilne opreme in operaterji so se trdno odločili, da bo to omrežje prihodnosti. Žal so s tem povzročili (vsaj začasen) zaton nekaterih drugih omrežij, kot je recimo WiMAX, ki ga trenutno proizvajalci in operaterji postavljajo na stranski tir. Prav to pa je močno pospešilo razvoj in razširjenost mobilnih omrežij LTE.

Letos smo mobilno omrežje LTE dobili tudi v Sloveniji. V tem delu je bilo predstavljeno trenutno stanje in možnost uporabe tega omrežja. Čeprav operater še ni ponudil ustreznega mobilnega telefona, je bilo omrežje možno preizkusiti z uporabo modema. Praktični preizkus

hitrosti omrežja je pokazal določeno stopnjo odstopanja od standarda. Za ta odstopanja obstajajo konkretni razlogi, ki so bili opisani v okviru preizkusa. Kljub temu pa je omrežje LTE še vedno veliko hitrejše od omrežij tretje generacije, kot sta na primer GSM/EDGE in UMTS/HSPA. Predstavljeni so bili tudi nadaljnji načrti operaterjev glede razvoja mobilnih omrežij LTE v Sloveniji. Iz njih je razvidno, da se operaterji trudijo s signalom LTE pokriti večji del Slovenije in jo tako v kratkem pripeljati v deželo mobilnosti četrte generacije.

Slike

Slika 2.1.: Časovni prikaz razvoja mobilnih omrežij.....	4
Slika 3.1.: Razvoj mobilnih omrežij od GSM do LTE [1].....	6
Slika 3.2.: Zahtevane zmogljivosti mobilnih omrežij po standardu LTE [8].	8
Slika 3.3.: Omrežni elementi sistema EPS.....	9
Slika 3.4.: Arhitektura omrežja LTE.....	10
Slika 3.5.: Arhitektura omrežja za dostop.....	12
Slika 3.6.: Modulaciji OFDMA in SC-FDMA.	13
Slika 3.7.: Frekvenčno-časovna predstavitev signala OFDM (Povzeto po [6]).	14
Slika 3.8.: Primer časovno-frekvenčnega multipleksa pri OFDMA.....	15
Slika 3.9.: Možne kombinacije antenskih sistemov z več vhodi in več izhodi.....	17
Slika 3.10.: Sprejemanje in oddajanje signalov pri uporabi več anten.	18
Slika 3.11.: Enouporabniški in večuporabniški sistem anten MIMO.	19
Slika 3.12.: Obravnavanje raznolikosti sprejetega signala.	20
Slika 3.13.: Antenski sistem MISO 2x1.....	21
Slika 3.14.: Način izračunavanja Alamoutijeve časovno-prostorske kode.....	21
Slika 3.15.: Sistem anten MIMO 2x2.	22
Slika 3.16.: Oblikovanje snopa s preklapljanjem in prilagodljivo oblikovanje snopa.....	23
Slika 3.17.: Glavne funkcionalnosti samoorganiziranega omrežja.....	25
Slika 3.18.: Koraki pri samokonfiguraciji omrežja.....	25
Slika 3.19.: Centralizirano, distribuirano in hibridno samoorganizirano omrežje.....	26
Slika 4.1.: Pokritost Slovenije s signalom LTE [9].	28
Slika 4.2.: Pokritost Ljubljane s signalom LTE [9].	28
Slika 4.3.: Modem USB E392 podjetja Huawei.	29
Slika 4.4.: Rezultati preizkusa omrežij GSM/EDGE in UMTS/HSPA.	30
Slika 4.5.: Rezultati preizkusa omrežja LTE v Ljubljani.....	31
Slika 4.6.: Rezultati preizkusa omrežja LTE na letališču Brnik.....	32
Slika 4.7.: Preizkus prenosa večje datoteke preko omrežja LTE v Ljubljani.	33
Slika 4.8.: Preizkus prenosa večje datoteke preko omrežja LTE na Brniku.....	33

Literatura

- [1] 3GPP. Dostopno na: <http://www.3gpp.org/LTE>
- [2] Dnevnik, 2012. Dostopno na: <http://www.dnevnik.si/svet/telekom-bo-omrezje-lte-ponudil-v-zacetku-prihodnjega-leta->
- [3] Jefe Nubarron, Evolution Of Mobile Technology, 2011. Dostopno na: <http://www.brighthub.com/mobile/emerging-platforms/articles/30965.aspx>
- [4] Monitor, 2012. Dostopno na: <http://www.monitor.si/novica/prvi-lte-pri-nas/>
- [5] Portio Research, Mobile Factbook 2012. Dostopno na: <http://www.portioresearch.com/en/free-mobile-factbook>
- [6] Rohde & Schwarz, UMTS Long Term Evolution (LTE), Technology Introduction, 2008.
- [7] Rohde & Schwarz, Introduction to MIMO, 2009. Dostopno na: http://www2.rhodeschwarz.com/file_12364/1MA142_0e.pdf
- [8] Sesia, Toufik, Baker. LTE The UMTS Long Term Evolution, John Wiley & Sons Ltd., 2009.
- [9] Si.mobil, 2012. Dostopno na: <http://www.simobil.si/sl/inside.cp2?cid=25FA5F0F-2EAE-2498-49CB-C12EEAD77BFC&linkid=coverageMap>
- [10] Sujuan Feng, Eiko Seidel, Self-Organizing Networks (SON) in 3GPP Long Term Evolution, 2008. Dostopno na: http://www.nomor.de/root/downloads/white-paper/selforganizingnetworksinlte_2008-05.pdf