

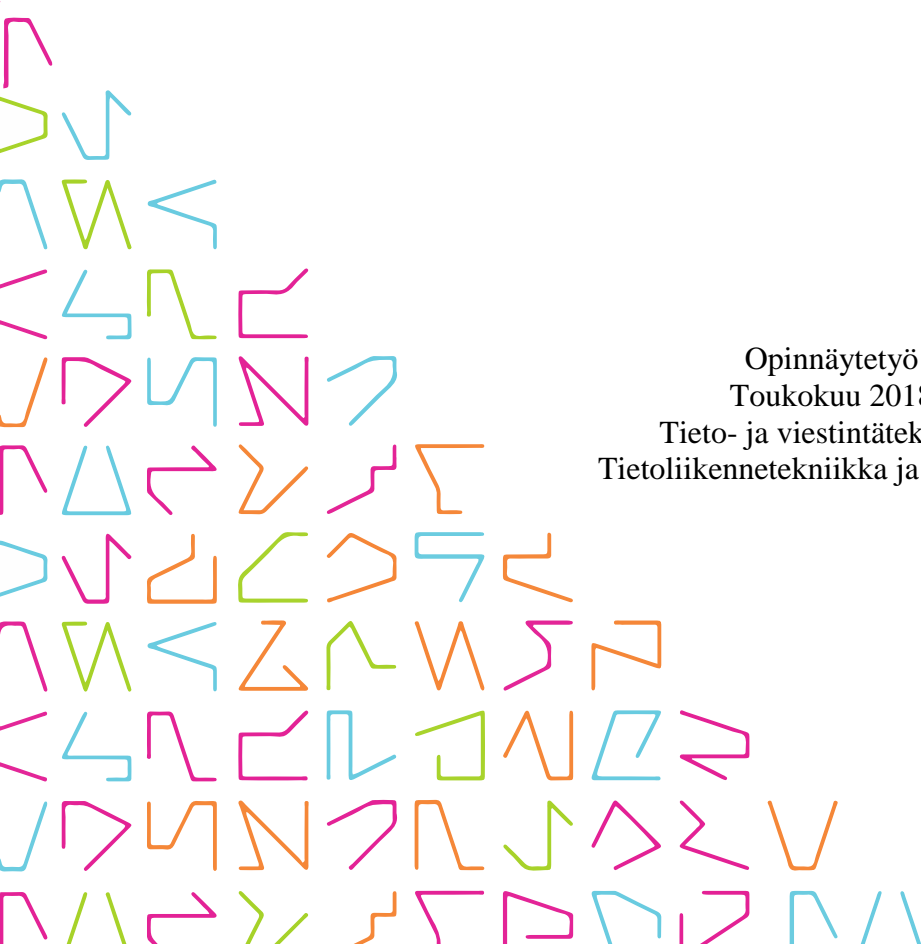


TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

LTE ja HSPA+ -verkkoarkkitehtuuri

Mateus Kilkki

Opinnäytetyö
Toukokuu 2018
Tieto- ja viestintäteknikka
Tietoliikennetekniikka ja tietoverkot



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tieto- ja viestintäteknikan koulutus
Tietoliikennetekniikka ja tietoverkot

KILKKI, MATEUS:
LTE ja HSPA+ -verkkoarkkitehtuuri

Opinnäytetyö 30 sivua
Toukokuu 2018

Opinnäytetyössä tutkitaan matkapuhelinverkkojen alkua 1940-luvulta alkaen ja näiden kehitystä vuosikymmenien aikana ihmiskunnan muuttuvien tarpeiden kanssa. Perehdytään 3GPP-järjestön (3rd Generation Partnership Project) muodostumiseen ja osuuteen modernien matkapuhelinverkkojen kehityksessä sekä 3GPP:n kehitysprosessiin ITU-R:n (International Telecommunication Union Radiocommunication Sector) asettamia vaatimuksia seuraten.

Kolmannen sukupolven matkapuhelinverkkojen käyttämää HSPA+ -tekniikkaa (Evolved High Speed Packet Access) tutkittiin ja verrattiin neljännen sukupolven OFDM-tekniikkaan (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Kolmannen sukupolven UMTS-verkkojen (Universal Mobile Telecommunications System) todettiin pohjautuvan CDMA-tekniikkaan (Code Division Multiple Access), mikä oli ottanut askeleen oikeaan suuntaan tiedonsiirtonopeuksien ja kapasiteettien kannalta, mutta ottaen huomioon kasvavan tiedonsiirron tarpeen voitiin todeta näiden palvelujen jäävän merkittävästi jälkeen. LTE-verkkojen (Long Term Evolution) käyttämien uusien OFDMA- (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), SC-FDMA- (Single-carrier FDMA) ja MIMO-tekniikoiden (Multiple Input and Multiple Output) ansioista 4G-verkot tekivät suuren parannuksen tiedonsiirron nopeuteen, kapasiteettiin ja häiriöiden sietokykyyn.

Kolmannen sukupolven UMTS-verkkoarkkitehtuuri koostui useammasta elementistä kuin neljännen sukupolven LTE-verkkoarkkitehtuuri, joka oli yksinkertaistettu jotta voitaisiin parantaa verkon suorituskykyä ja vähentää viiveitä. Vaikka LTE-verkkoarkkitehtuuria yksinkertaistettiin käytetyt tekniikat monimutkaistuivat, jotta verkkoihin voitaisiin saada mahdollisimman monta käyttäjää rajoittamatta kapasiteettia tai tiedonsiirtonopeutta.

Työssä verrattiin vielä toisiinsa näiden matkapuhelinverkkojen datansiirtonopeuksia downlink-suunnassa. HSPA+ -tekniikkaa käyttävät verkot saavuttivat ideaalissa olosuhteissa nopeuden 42,2 Mbit/s, kun taas LTE-tekniikkaa käyttävät uudemmat verkot saavuttivat ideaalisissa olosuhteissa nopeuden 299,6 Mbit/s. Näiden todettiin jäävän kiinteisiin kuituverkkoihin verrattuna selvästi jälkeen, mutta tulevaisuuden 5G-verkkojen integrointi 4G-verkkojen kanssa voisi tarjota parempia palveluja kuin kiinteät kuituverkot nykyään.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in ICT Engineering
Telecommunications and Networks

KILKKI, MATEUS:
LTE and HSPA+ Network Architecture

Bachelor's thesis 30 pages
May 2018

This thesis researched the beginning of cellular networks starting from the 1940s and followed the evolution of these networks over the decades, as mankind's changing needs regarding these networks took a clear direction. This paper looks at the formation of the 3GPP organization (3rd Generation Partnership Project) and its part in the shaping of modern cellular networks. 3GPP's network development process following the requirements laid down by ITU-R (International Telecommunication Union Radiocommunication Sector) is also focused upon.

The HSPA+ technology (Evolved High Speed Packet Access) used by third generation cellular network is researched and compared to the OFDM technology (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) that the fourth generation cellular networks are based on. It is noted that the CDMA technology (Code Division Multiple Access) that UMTS networks are based on to be a step in the right direction, but found lacking when looking at the ever growing data transfer needs of mankind. The OFDMA- (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), SC-FDMA- (Single-carrier FDMA) ja MIMO-technologies (Multiple Input and Multiple Output), that 4G networks utilize, made a noticeable improvement to the speed, capacity and interference resistance aspects of cellular networks.

The 4G network architecture consisted of fewer network elements than 3G network architecture so the performance of the network could be maximized. Even though 4G network architecture was simplified, the technology was more complex to have a larger number of user devices simultaneously in the network and not sacrifice data transfer rates.

The downlink data transfer speeds offered by HSPA+ and LTE networks were compared. HSPA+ networks could produce a speed of 42.2 Mbit/s in ideal conditions, while LTE networks could reach 299.6 Mbit/s similarly in ideal conditions. Even though these were data transfer rates capable of supporting video playback, these both fall short when compared to fiber optic networks. As for the future, the integration of 4G- and 5G networks could potentially offer better services than fiber optic networks offer this day.

Key words: cellular network, 3GPP, HSPA+, LTE

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	9
2	MATKAPUHELINVERKKOJEN TAUSTAA.....	10
2.1	Mobiiliverkkojen historia	10
2.1.1	1G-matkapuhelinverkot.....	10
2.1.2	2G-matkapuhelinverkot.....	10
2.1.3	3G-matkapuhelinverkot.....	11
2.1.4	4G-matkapuhelinverkot.....	11
2.1.5	5G-matkapuhelinverkot.....	12
2.2	3GPP	13
2.2.1	Kehitysprosessi	14
3	TEKNIIKAT	16
3.1	HSPA+ -tekniikka.....	16
3.2	LTE-verkot.....	16
3.2.1	OFDMA-tekniikka	17
3.2.2	SC-FDMA-tekniikka.....	18
3.2.3	MIMO-antennitekniikka	19
4	VERKKOJEN ARKKITEHTUURI.....	21
4.1	UMTS-verkkojen arkkitehtuuri	21
4.1.1	UMTS-runkoverkko.....	21
4.1.2	UTRAN-radioverkko	23
4.2	LTE-verkkojen arkkitehtuuri	24
4.2.1	EPC-runkoverkko.....	25
4.2.2	E-UTRA-radioverkko	26
5	VERTAILU	28
6	POHDINTA.....	29
	LÄHTEET.....	30

LYHENTEET JA TERMIT

0G	Nollannen sukupolven matkapuhelinteknologia
1G	Ensimmäisen sukupolven matkapuhelinteknologia
2G	Toisen sukupolven matkapuhelinteknologia
3G	Kolmannen sukupolven matkapuhelinteknologia
4G	Neljännän sukupolven matkapuhelinteknologia
5G	Viidennen sukupolven matkapuhelinteknologia
3GPP	3rd Generation Partnership Project, usean standardijärjestön yhteisorganisaatio
3GPP2	3rd Generation Partnership Project 2, cdma2000 standardointijärjestö
AMPS	Advanced Mobile Phone System, analoginen ensimmäisen sukupolven matkapuhelinjärjestelmä
AuC	Authentication Center, vastuussa SIM-korttien autentikoinnista
CDMA	Code Division Multiple Access, koodijakokanavointi, joka on radiotien kanavanvaraustekniikka
E-UTRA	Evolved Universal Terrestrial Radio Access, LTE-matkapuhelinverkkojen radioverkko
EIR	Equipment Identity Register, tietokanta, joka sisältää luettelon kaikista verkossa voimassa olevista päätelaitteista
eNodeB	Evolved NodeB, LTE-verkoissa käytetty tukiasema
EPC	Evolved Packet Core, LTE-matkapuhelinverkkojen runkoverkko
ETSI	European Telecommunications Standards Institute, eurooppalainen telealan standardisointijärjestö
FDD	Frequency Division Duplex, taajuusjakoinen dupleksointi
GGSN	Gateway GPRS, vastuussa UMTS-verkon ja ulkopuolisten pakettivälitteisten verkkojen välisestä yhteydestä
GMSC	Gateway Mobile Switching Centre, UMTS-verkkojen osa, joka reitittää puhelut verkon ulkopuolella
GSM	Global System for Mobile Communications, toisen sukupolven matkapuhelinverkoissa käytetty tekniikka

HLR	Home Location Register, tietokanta, joka sisältää tiedot käyttäjistä, joilla on lupa käyttää verkkoa
HSPA	High Speed Packet Access, edellisten kolmannen sukupolven matkapuhelinverkkoprotokollien parannus
HSPA+	Evolved High Speed Packet Access, uudistus HSPA-protokollaan, joka yksinkertaistaa arkkitehtuurin ja kasvattaa tiedonsiirtonopeutta
HSS	Home Subscriber Server, LTE-matkapuhelinverkosten runkoverkossa autentikoinnin suorittava tietokanta
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, kansainvälinen tekniikan alan järjestö
IMEI	International Mobile Equipment Identity, yksilöllinen sarjanumero, joka on kaikissa matkapuhelimissa
IMT-2000	International Mobile Telecommunications for the year 2000, maailmanlaajuinen kokoelma vaatimuksia kolmannen sukupolven matkapuhelinverkoille
IMT-Advanced	International Mobile Telecommunications Advanced Standard, vaatimuksia neljännen sukupolven matkapuhelinverkoille
IMTS	Improved Mobile Telephone System, parannus MTS-tekniikkaan, joka mahdollisti suorat yhteydet
IP	Internet Protocol, internet-kerroksen protokolla vastuussa IP-liikennepakettien toimittamisesta
ITU	International Telecommunication Union, YK:n televiestintäverkkoja ja -palveluja koordinoiva järjestö
ITU-R	ITU Radiocommunications Sector, ITU:n radiosektori vastuussa radioviestinnästä ja standardien kehittämisestä
LTE	Long Term Evolution, neljännen sukupolven matkapuhelinverkoissa käytetty tekniikka
MIMO	Multiple-Input and Multiple-Output, tietoliikennetekniikka, jossa käytetään useampaa antennia sekä lahetys- ja vastaanotinpuolella
MSC	Mobile Switching Centre, toisen- ja kolmannen sukupolven matkapuhelinverkon osa, joka toimii käyttäjä- ja ohjaustason välillä

MTS	Mobile Telephone Service, nollannen sukupolven matkapuhelinverkoissa käytetty radioverkkotekniikka
NMT	Nordic Mobile Telephone, ensimmäinen täysin automaattinen ensimmäisen sukupolven matkapuhelinverkko
NodeB	UMTS-verkoissa käytetty tukiasema
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing, moduloi datan useaan toisiaan häiritsemättömään taajuuskanavaan
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access, multi-access OFDM-modulaatio
P-GW	Packet Data Network Gateway, vastuussa kaikesta LTE-verkon ja ulkopuolisien pakettivälitteisten verkkojen yhteyksistä
PTT	Push-to-talk, yhteysmuoto, jolla voidaan luoda yksisuuntaisia puheyhteyksiä ja näppäintä painettaessa lähetetään puhetta
RAN	Radio Access Network, matkapuhelinverkoissa päätelaitteiden ja runkoverkon yhdistävä osa
RNC	Radio Network Controller, UMTS-verkoissa radioresursseja hallitseva osa
RNS	Radio Network Subsystem, vastuussa UMTS-verkoissa päätelaitteen ja tukiaseman välisen yhteyden luomisesta
S-GW	Serving Gateway, vastuussa kaikesta LTE-verkon sisäisestä pakettidatan reitityksestä
SAE	System Architecture Evolution, toinen termi LTE-matkapuhelinverkkojen runkoverkolle
SGSN	Service GPRS, vastuussa kaikesta UMTS-verkon sisällä tapahtuvasta pakettivälitetystä datasta
SMS	Short Message Service, matkapuhelinverkkojen komponentti, joka mahdollistaa lyhyiden viestien lähettämisen
TD-SCDMA	Time Division Synchronous Code Division Multiple Access, Kiinassa käytetty vaihtoehto WCDMA-tekniikalle
TDD	Time Division Duplex, aikajakoinen dupleksointi
TDMA	Time Division Multiple Access, aikajakokanavointi, joka on radiotien kanavanvaraustekniikka
UE	User Equipment, päätelaite joka on yhteydessä tukiasemaan

UMTS	Universal Mobile Telecommunications System, yleinen kolmannen sukupolven matkapuhelinverkko
USIM	Universal Subscriber Identity Module, päätelaitteissa sijaitseva kortti, jonka mikrosiru tallentaa tietoja ja salaa ääni- ja datanlähetyksen
UTRAN	Universal Terrestrial Radio Access Network, yleinen termi verkolle ja laitteille, jotka yhdistävät päätelaitteen verkkoon
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access, laajakaistan CDMA-tekniikka, jota käytetään kolmannen sukupolven matkapuhelinverkoissa
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access, IEEE:n langaton laajakaistatekniikka

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tarkastella kolmannen- ja neljännen sukupolven matkapuhelinverkkojen arkkitehtuuria. Pääasiassa työssä tutkittiin LTE- (Long Term Evolution) ja HSPA+ -tekniikoita (Evolved High Speed Packet Access). Työssä perehdyttiin myös matkapuhelinverkkojen historiaan, kehityksen syihin, nykyisien matkapuhelinverkkojen tilanteeseen ja 3GPP-järjestön (3rd Generation Partnership Project) osuuteen näissä asioissa.

Työssä tutkittiin tarkemmin kolmannen- ja neljännen sukupolven matkapuhelinverkkojen verkkoarkkitehtuuria. Työssä myös käsiteltiin, joskin pintapuolisesti, tekniikoita, joita myöhäiset 3G- ja varhaiset 4G-matkapuhelinverkot hyödyntävät.

Lopuksi opinnäytetyössä tutkittuja verkkoja vertailtiin ja annettiin yhteenveto näistä syntyneistä ajatuksista ja matkapuhelinverkkojen lähitulevaisuudesta. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli antaa kuva matkapuhelinverkkojen kehityksestä ja tarkempi ymmärrys 3G- ja 4G-matkapuhelinverkkojen toiminnasta.

2 MATKAPUHELINVERKKOJEN TAUSTAA

2.1 Mobiiliverkkojen historia

Matkapuhelinverkot ja päätelaitteet ovat kehittyneet kalliista ja vain harvojen käyttämästä tekniikasta jokapäiväiseksi hyödykkeeksi, jota ihmisten enemmistö käyttää päivittäin. Niin kutsutut nollannen sukupolven matkapuhelinverkot olivat nykyisien matkapuhelinverkkojen edeltäjiä, vaikka nämä verkot muistuttivat enemmän radiopuhelinverkkoja.

Nollannen sukupolven matkapuhelinverkon (0G) toiminta oli lähempänä radiopuhelimia toiminnan ja spesifikaatioiden vuoksi. Ensimmäinen kaupallinen 0G-verkko avattiin vuonna 1946. 0G-verkkojen toimivuus jätti paljon kaivattavaa, kuten saumattoman siirtymisen tukiasemien välillä ja tukiasemien laajan kattavuuden (Meraj ud in Mir 2015). 0G-standardeihin kuuluivat PTT (Push to Talk), MTS (Mobile Telephone Service) ja IMTS (Improved Mobile Telephone Service).

2.1.1 1G-matkapuhelinverkot

Ensimmäisen sukupolven matkapuhelinverkot (1G) olivat 1980-luvun järjestelmiä, jotka tukivat ainoastaan analogisia standardeja (Dahlman, Parkvall & Sköld 2016, 1). Sen ajan matkapuhelinverkkojen saatavuus oli usein rajoitettua, jonka lisäksi kansainväliset yhteydet olivat lähes olemattomat. Yleisimpiin 1G-standardeihin kuuluivat NMT (Nordic Mobile Telephone), AMPS (Advanced Mobile Phone System) ja TACS (Total Access Communications System).

2.1.2 2G-matkapuhelinverkot

Toisen sukupolven matkapuhelinverkko (2G) esiteltiin varhain 1990-luvun alussa. Nämä järjestelmät olivat vielä etupäässä puheen siirtoon tarkoitettuja mutta kuitenkin täysin digitaalisia, mikä mahdollisti suuremman kapasiteetin edellisiin matkapuhelinverkkoihin verrattuna (Dahlman, Parkvall & Sköld 2016, 2). Myös SMS-viestintäpalvelu (Short

Message Service) otettiin käyttöön tämän sukupolven matkapuhelinverkoissa. 2G-standardeja ovat esimerkiksi eurooppalainen GSM (silloin Groupe Spécial Mobile, nykyään Global System for Mobile Communications), amerikkalaiset IS-95/CDMA (Interim Standard 95/Code-division multiple access) ja IS-136/TDMA (Interim Standard 136/Time-division multiple access) sekä japanilainen PDC (Personal Digital Cellular).

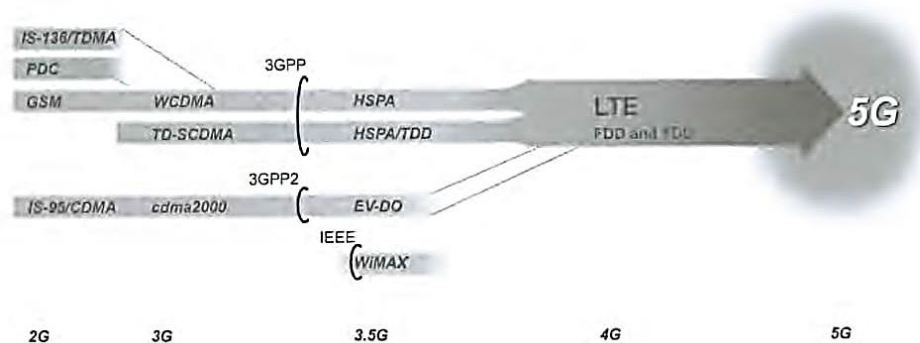
2.1.3 3G-matkapuhelinverkot

Toisen sukupolven matkapuhelinverkon käytön aikana 1990-luvulla huomattiin kasvava tarve tukea datapalveluja puhelujen lisäksi. Jotta 3G-verkoille saataisiin maailmanlaajuinen peittoalue, oli tarve kehittää verkkoja maailmanlaajuisesti. Tämän vuoksi luotiin 3GPP (Third Generation Partnership Project) (Casaccia, L. 2017). Vuonna 1999 valmistui WCDMA-tekniikka (Wideband Code Division Multiple Access) käyttävä ensimmäinen julkaisu. Tämä julkaisu sisälsi piirikytkentäiset ääni- ja videopalvelut sekä tuen piiri- ja pakettikytkentäisille datapalveluille (Dahlman, Parkvall & Sköld 2016, 2). WCDMA-tekniikka sai merkittävän parannuksen 3GPP:n standardijulkaisussa 5 käyttöön otetussa HSPDA-tekniikassa (High Speed Downlink Packet Access) ja standardijulkaisussa 6 käyttöön otetussa HSUPA-tekniikassa (High Speed Uplink Packet Access). Nämä parannukset mahdollistavat nopean mobiililaajakaistan säilyttäen yhteensopivuuden alkuperäisen 3G-verkon kanssa. (Dahlman, Parkvall & Sköld 2016, 3).

2.1.4 4G-matkapuhelinverkot

Puolivälissä 2000-lukua tuli selväksi, että 3G-verkot ylikuormittuisivat nopeamman datapalvelun tarpeen takia, joten 3GPP alkoi suunnitella neljännen sukupolven matkapuhelinverkon standardeja. 4G:lle asetetut standardit eivät ainoastaan vaatineet nopeampia datan siirtonopeuksia, mutta ne edellyttivät myös, että 4G-järjestelmät rakennettaisiin siten, että ne sopisivat datansiirtoon, mikä taas tarkoitti IP-protokollan (Internet Protocol) pakettikytkentäisen arkkitehtuurin käyttöä (3GPP – LTE). 3GPP:n vastaus näihin tarpeisiin oli LTE (Long Term Evolution), 3GPP2:n vastaus oli UMB (Ultra Mobile Broadband) ja IEEE:n (Institute of Electrical and Electronics Engineers) vastaus oli WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access).

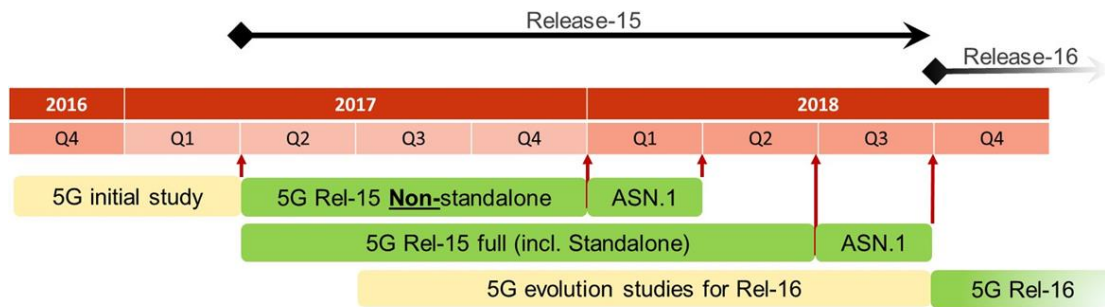
Useiden teknisien haasteiden ja ratkaisujen jälkeen LTE-järjestelmästä kehittyi maailmanlaajuisesti hyväksytty 4G-standardi. Toisin kuin aiempien sukupolvien matkapuhelinverkkojen kanssa, joilla oli useita kilpailevia tekniikoita, LTE:llä ei ollut näitä esteitä, ja LTE:n kehittyminen yleisesti hyväksytyksi tekniikaksi nopeutti uusien palvelujen käyttöönottoa ja vähensi kustannuksia kaikille osapuolille. Kuva 1 esittää edellisten sukupolvien matkapuhelinverkkojen kilpailua verrattuna nykyiseen yhteen yhteiseen verkkoon.



KUVA 1. Matkapuhelinverkkojen yhtyminen (Dahlman, Parkvall & Sköld 2016, 3)

2.1.5 5G-matkapuhelinverkot

Viidennen sukupolven matkapuhelinverkon (5G) päämääränä on parantaa merkittävästi edellisten matkapuhelinverkkojen suorituskykyä, joustavuutta, skaalautuvuutta ja tehokkuutta (Kavanagh 2017). 5G on tarkoitus ottaa käyttöön parantamalla edellisiä LTE- ja LTE-Advanced-tekniikoita, jonka jälkeen seuraisi uuden ilmarajapinnan käyttöönotto nimeltä 5G NR (5G New Radio). Kuva 2 viittaa nykyisiin julkaisuaikatauluihin 5G-verkkojen kehityksessä. Itse 5G NR on arvioitu otettavan käyttöön 2020-luvun alussa. Standardijulkaisu 15 NSA (Non-standalone) julkaistiin vuoden 2017 joulukuussa ja standardijulkaisu 15 Full kerrottiin olevan suunniteltu vuoden 2018 loppupuolelle (3GPP – Release 15).

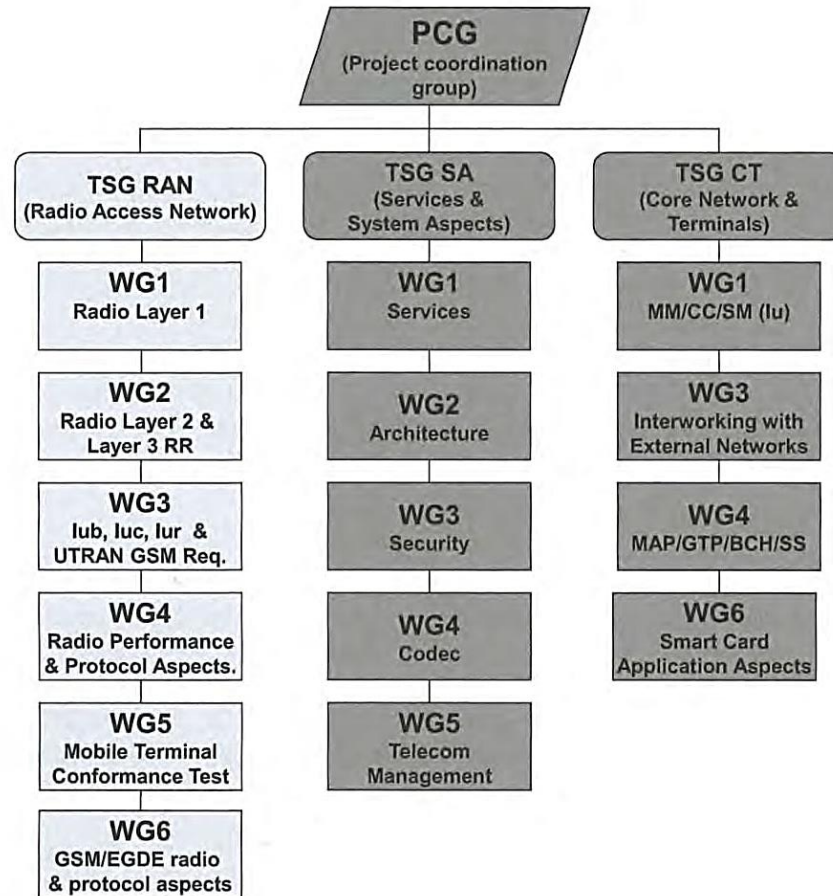


KUVA 2. 3GPP:n suunniteltu 5G NR -aikataulu (3GPP - Release 15)

2.2 3GPP

3GPP luotiin alunperin vuoden 1998 joulukuussa, kun ETSI (European Telecommunications Standards Institute) alkoi tehdä yhteistyötä muiden SDO-organisaatioiden (Standard Development Organization) kanssa ympäri maailmaa kehittääkseen kolmannen sukupolven matkapuhelinverkoille teknisiä standardeja (Casaccia, L. 2017). Samalla toinen ryhmä järjestöjä Yhdysvalloissa muodosti 3GPP2-organisaation (Third Generation Partnership Project 2).

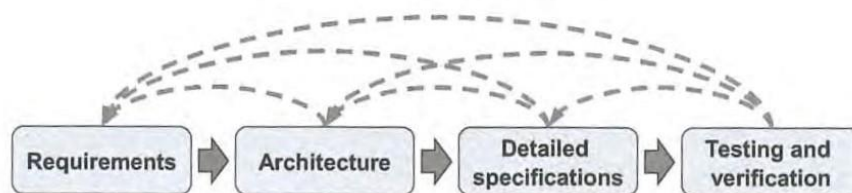
Nämä organisaatiot kehittivät omia spesifikaatiotaan tuleville standardeille. 3GPP keskittyi kehittämään 3G WCDMA- ja TD-SCDMA-tekniikoita (Time Division Synchronous Code Division Multiple Access), kun taas 3GPP2 keskittyi kehittämään 3G cdma2000-tekniikkaa. Molemmat organisaatiot päätyivät lopulta käyttämään CDMA-tekniikkaa. WCDMA-tekniikka käyttää 5 MHz:n kaistanleveyttä ja cdma2000-tekniikka käyttää 1,5 MHz:n kaistanleveyttä (Casaccia, L 2017). Kansainvälinen televiestintäliitto, ITU (International Telecommunication Union), hyväksyi molemmat tekniikat virallisina 3G-standardeina. 3GPP:n organisaatorakenne koostuu kuvan 3 mukaisesti johtotasosta PCG (Project Coordination Group), joka ohjaa kolmea eri osastoa, joita kutsutaan nimikkeillä TSG (Technical Specifications Group).



KUVA 3. 3GPP-organisaation rakenne (Dahlman, Parkvall & Sköld 2016, 26)

2.2.1 Kehitysprosessi

Teknisten spesifikaatioiden kehittäminen on jatkuva prosessi. 3GPP käyttää kuvan 4 mukaista neljän askeleen prosessia. Nämä askeleet ovat päällekkäisiä ja toistuvia. Työssään 3GPP seuraa ITU-R:n (International Telecommunication Union Radiocommunication Sector) suosituksia, ja työn tulokset toimitetaan ITU-R:lle osana IMT-2000- ja IMT-Advanced-standardeja (Dahlman, Parkvall & Sköld 2016, 25).



KUVA 4. 3GPP:n standardointivaiheet (Dahlman, Parkvall & Sköld 2016, 24)

Requirements-vaihe on melko lyhyt, koska siinä määritellään ainoastaan, mitkä vaatimukset halutaan saavuttaa kyseisellä spesifikaatiolla. (Dahlman, Parkvall & Sköld 2016, 24.)

Architecture-vaiheessa päätetään spesifikaatiossa käytettävä arkkitehtuuri, joka on periaate, millä vaatimukset täytetään. Päätöksiin kuuluu referenssipisteiden määrittely ja standardoitavat rajapinnat. Tämä vaihe on kehityksessä usein eniten aikaa vievä, ja vaatimukset saattavat vaihtua prosessin aikana. (Dahlman, Parkvall & Sköld 2016, 24.)

Detailed Specifications -vaihe alkaa arkkitehtuurin ollessa valmis, ja tässä vaiheessa määritellään kunkin arkkitehtuurissa tunnistetun rajapinnan yksityiskohdat. Tässä vaiheessa joudutaan usein tarkistamaan ja mahdollisesti muuttamaan edellisissä vaiheissa tehtyjä päätöksiä ja vaatimuksia. (Dahlman, Parkvall & Sköld 2016, 24.)

Testing and verification -vaihe ei ole varsinaisesti osa prosessia, vaan tapahtuu samanaikaisesti myyjien testauksen ja myyjien välisen yhteentoimivuustestauksen avulla. Tässä vaiheessa yritetään löytää mahdollisia virheitä ja korjata niitä, ennen kuin spesifikaatio merkitään valmiiksi. Spesifikaatioiden valmistumisesta kestää normaalisti vuosi, kunnes niitä käyttävät kaupalliset tuotteet ovat markkinoilla. (Dahlman, Parkvall & Sköld 2016, 25.)

3 TEKNIIKAT

3.1 HSPA+ -tekniikka

HSPA (High Speed Packet Access) julkaistiin kahdessa osassa parantamaan WCDMA-tekniikkaa hyödyntävien verkkojen pakettidatan suorituskykyä. HSDPA-tekniikka (High Speed Downlink Packet Access) otettiin käyttöön standardijulkaisussa 5 vuonna 2002 ja HSUPA-tekniikka (High Speed Uplink Packet Access) otettiin käyttöön standardijulkaisussa 6 vuonna 2004. Näiden kahden tekniikan kombinaatiota kutsutaan HSPA:ksi. HSPA+ (Evolved High Speed Packet Access) on HSPA:n toinen vaihe, jonka tarkoitus oli hyödyntää CDMA-tekniikan täyttä potentiaalia ennen siirtymistä OFDM-tekniikkaan (Zellmer, J. 2012 – HSPA+).

Uplink-suunnassa käytetään 16QAM-modulaatiota, kun taas downlink-suunnassa käytetään 64QAM-modulaatiota, mikäli päätelaite pystyy siihen. Tämän uudistuksen kanssa HSPA+ voi käyttää myös CPC-ominaisuuksia (Continuous Packet Connectivity), joiden päämäärä oli pitää päätelaite jatkuvasti kytkettynä matkapuhelinverkkoon sekä vähentää päätelaitteen virrankulutusta ja parantaa yhteyksien laatua. 3GPP:n standardijulkaisussa 8 otettiin käyttöön DS-HSDPA-tekniikka (Dual-Cell HSDPA), joka mahdollisti downlink-suunnassa samanaikaisen datasiirron kahdesta solusta. (Zellmer, J. 2012 – HSPA+.)

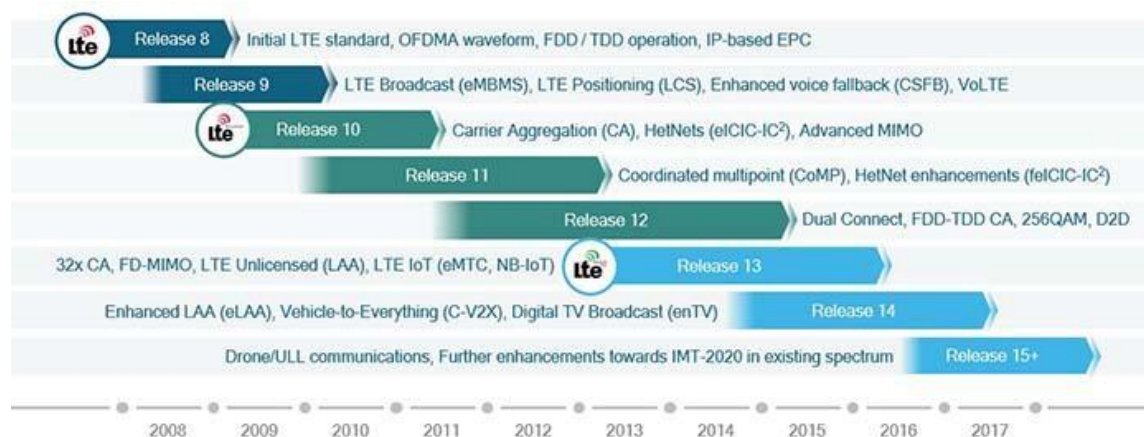
Suurin osa päätelaitteista tukee HSPA+ -tekniikkaa ja tämän tekniikan käyttöönotto ei vaatinut suuria kustannuksia kuten LTE-verkkojen rakentaminen, joten tästä tuli suosittu palvelu operaattorien kesken. Operaattorit ovat korvaamassa näitä verkkoja uudemmalla tekniikalla, mutta koska datan siirtonopeus on vielä riittävä videon toistoon, ei muutos ole nopea (Zellmer, J. 2012 – HSPA+).

3.2 LTE-verkot

LTE:n käyttämä OFDM-tekniikka (Orthogonal Frequency Division Multiplex) on lähetysmuoto, joka käyttää suurta määrää lähekkäin sijoitettuja kanavia. Tyypillisesti nämä signaalit häiritsisivät toisiaan, mutta tekemällä signaalit ortogonaalisiksi ne eivät

aiheuta odotettua häiriötä. Lähetettävä data jaetaan useille kantoaalloille, jotta saataisiin joustavuutta valikoivaa häipymistä (engl. *selective fading*) vastaan. On huomioitava että tämä tekniikka implementoitiin eri tavoin uplink- ja downlink-suunnissa. (Poole – LTE OFDM.)

OFDM toimii TDD- (Time Division Duplex) ja FDD-dupleksointimenetelmillä (Frequency Division Duplex). Tämän lisäksi OFDM-tekniikat ovat toimintansa takia häiriötä sietäviä ja erittäin sopivia suurilla siirtonopeuksilla, mikä on yksi LTE:n tärkeimmistä tavoitteista (Poole – LTE OFDM). Uplink-suunnassa päätettiin käyttää SC-FDMA-tekniikkaa ja downlink-suunnassa OFDMA-tekniikkaa. Kuvassa 5 näytetään LTE-tekniikoiden kehittymistä 3GPP:n standardijulkaisujen kanssa. Käyttäjille LTE:n oli tarkoitus tarjota suurempia siirtonopeuksia, pienempää viivettä ja vähentää virrankulutusta. Sekä uplink- että downlink-suunnissa suurin virrankulutus menee kanavien dekodaukseen (Holma & Toskala 2009, 80).



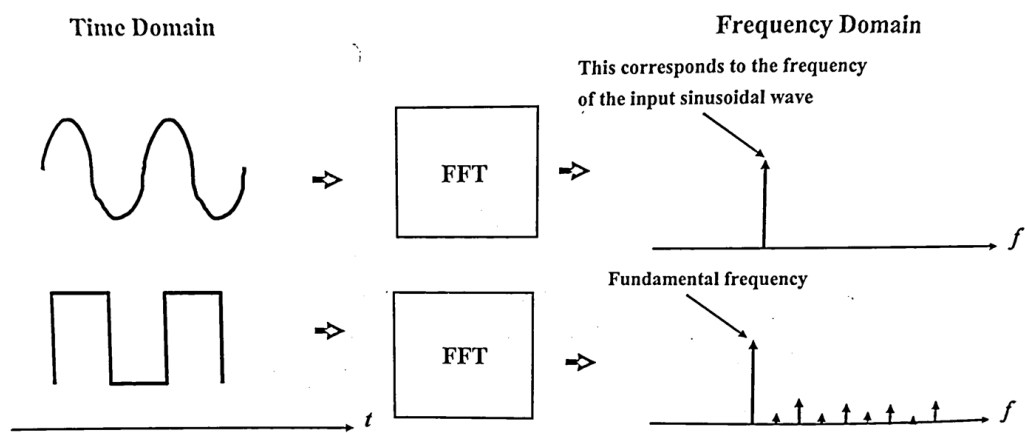
KUVA 5. 4G LTE:n kehittyminen 3GPP:n standardijulkaisujen mukaan (Casaccia, L. 2017)

3.2.1 OFDMA-tekniikka

Yleinen motivaatio käyttää OFDMA-tekniikkaa LTE:ssä perustui hyvään häirinnän sietokykyyn, kantataajuuskaistan vastaanottimen yksinkertaiseen rakenteeseen, hyviin spektriominaisuuksiin ja yhteensopivuuteen monimutkaisien vastaanotin- ja antennitekniikkojen kanssa (Holma & Toskala 2009, 69). Haasteena tässä tekniikassa oli toleranssi taajuussiirtymää vastaan, joka ratkaistiin LTE:ssä käyttämällä kiinteää kanavanväliä, joka antaa tarpeeksi suuren toleranssin Doppler-siirtymää vastaan.

OFDMA-tekniikkaa käytävissä systeemeissä lähetteen periaate on hyödyntää kapeita, keskenään ortogonaalisia apukantoaaltoja, joiden väli on LTE:ssä 15 kHz riippumatta lähetykskaistanleveydestä (Holma & Toskala 2009, 71).

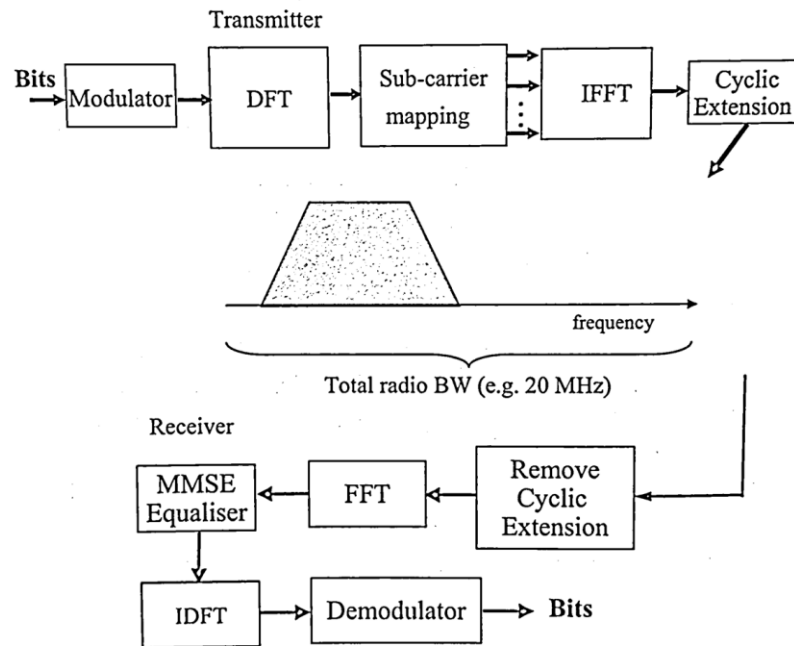
Käytännön toteutus perustuu digitaalisiin DFT- (Discrete Fourier Transformation) ja IDFT-tekniikoihin (Inverse Discrete Fourier Transformation). Näiden avulla voidaan liikkua aika- ja taajuustilojen välillä. Signaalin syöttäminen DFT-lohkon läpi on havainnollistettu kuvassa 6. DFT-operaatio siirtää signaalin aikatasosta taajuustasoon ja IDFT-operaatio toteuttaa operaation juuri päinvastoin. (Holma & Toskala 2009, 70-71.)



KUVA 6. FFT-operaation vaikutus eri sisäänmenoilla (Holma & Toskala 2009, 70)

3.2.2 SC-FDMA-tekniikka

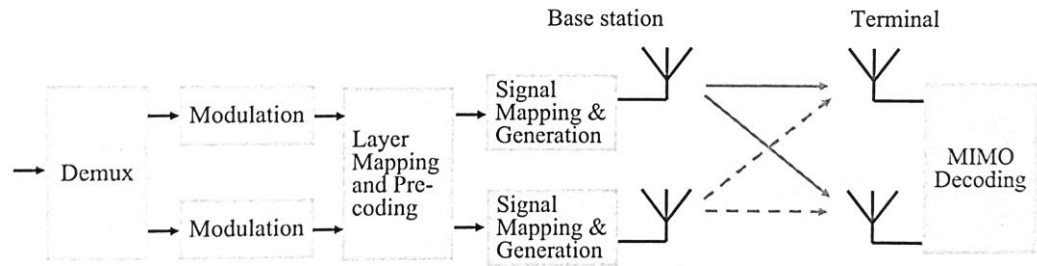
LTE:n uplink-suunnassa päätettiin käyttää SC-FDMA-tekniikkaa, minkä toimintaa voidaan verrata GSM-verkoissa käytettyyn QAM-moduloituun TDMA-tekniikkaan (Time Division Multiple Access). Kuvassa 7 esitetään signaalin taajuusalueen luontia OFDMA-tekniikka käyttäen, joka mahdollistaa paremman spektrin muodon kuin QAM-moduloiduissa signaaleissa. Näin poistettiin tarve käyttää suojakaistaa jokaisen käyttäjän välillä (Holma & Toskala 2009, 76). SC-FDMA-tekniikka mahdollistaa päätelaitteissa päätevahvistimelle hyvän hyötysuhteen ja siten pienentää virrankulutusta (Holma & Toskala 2009, 79).



KUVA 7. SC-FDMA-lähettimeen ja vastaanottimen taajuusalueen synkronointi (Holma & Toskala 2009, 76)

3.2.3 MIMO-antennitekniikka

MIMO (Multiple Input Multiple Output) on tiedonsiirron kannalta yksi tärkeimpiä tekniikoita, joka julkaistiin LTE:n ensimmäisen kaupallisen version kanssa. LTE-matkapuhelinverkoissa sekä uplink- että downlink-suunnat tukevat MIMO-tekniikkaa. MIMO:n oleellisen tekniikan, tilallisen limityksen (engl. *spatial multiplexing*), perusperiaate on lähettää signaali kahdesta tai useammasta antennista eri datavirtoja käyttäen. Signaalinkäsittelyssä vastaanottaja erottelee nämä datavirrat toisistaan ja nostaa datan siirtonopeutta joko kahden (kuva 8) tai neljän kertoimella riippuen antennien konfiguraatiosta LTE:n ensimmäisessä julkaisussa. (Holma & Toskala 2009, 80.) Myöhemmät LTE:n versiot tukivat korkeampia MIMO-konfiguraatioita.



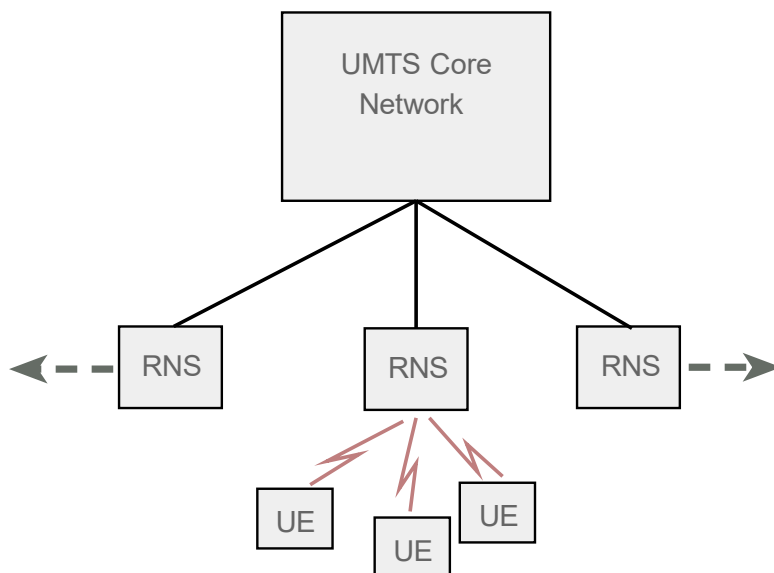
KUVA 8. MIMO-periaate 2x2 konfiguraatio (Holma & Toskala 2009, 80)

OFDMA-tekniikkaa hyödyntävät verkot ovat MIMO:n käyttöön sopivia, koska hyvin suoritettu MIMO-operaatio vaatii suuren signaalikohinasuhteen (Signal-to-noise ratio). Tämä operaatio hyötyy OFDMA-tekniikkaa käyttävien systeemien paikallisesti suuresta SNR-arvosta, joka on saavutettavissa OFDM-tekniikkaa käyttäen (Holma & Toskala 2009, 80).

4 VERKKOJEN ARKKITEHTUURI

4.1 UMTS-verkkojen arkkitehtuuri

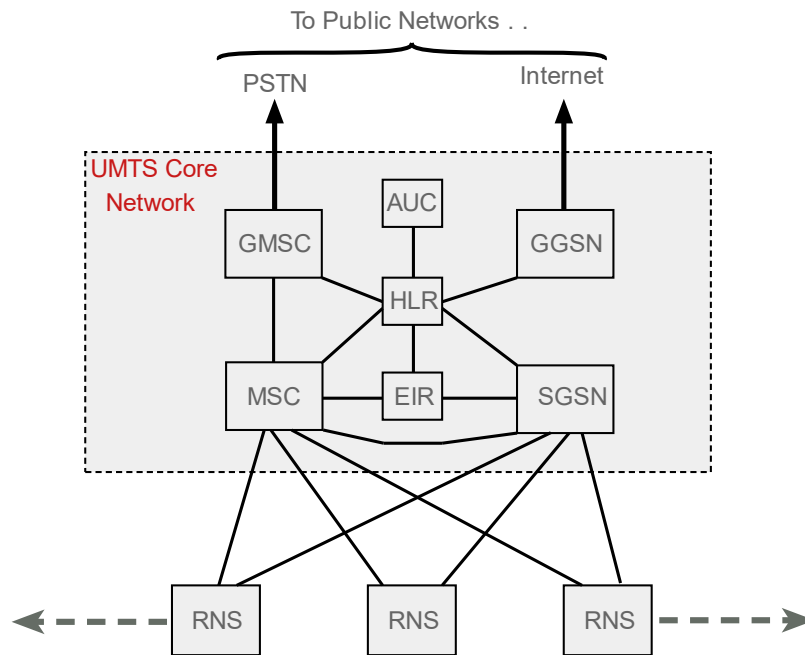
1990-luvulla esiin tulleiden vaatimuksien takia päätettiin kehittää uusi verkkoarkkitehtuuri seuraavan sukupolven matkapuhelinverkoille hyödyntäen CDMA-tekniikkaa. Tämän verkon (kuva 9) nimeksi annettiin UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). W-CDMA-tekniikkaa käyttävässä UMTS-verkossa voidaan käyttää suurempaa kaistanleveyttä ja parempaa spektritehokkuutta. UMTS-verkon arkkitehtuuri voidaan jakaa kolmeen osaan jotka ovat runkoverkko, radioverkko ja päätelaitteet.



KUVA 9. UMTS-verkon elementit (Poole – 3G UMTS)

4.1.1 UMTS-runkoverkko

UMTS-runkoverkon arkkitehtuuria (kuva 10) voidaan verrata GSM-runkoverkon arkkitehtuuriin, mutta UMTS-runkoverkossa on enemmän elementtejä, jotta vaaditut lisätoiminnot voitaisiin toteuttaa. Tämä runkoverkko voidaan jakaa pakettikytkentäisiin elementteihin, piirikytkentäisiin elementteihin ja näitä kumpaakin hyödyntäviin elementteihin.



KUVA 10. UMTS-runkoverkko (Poole – 3G UMTS)

Piirikytkentäiset elementit perustuvat GSM-verkon osiin. MSC (Mobile Switching Centre) on ensimmäinen tämän tyyppisistä elementeistä ja hoitaa käynnissä olevat piirikytkentäiset puhelut. GMSC (Gateway MSC) on toinen piirikytkentäisistä elementeistä, ja on käytännössä liitäntä ulkoisiin verkkoihin. (Poole – 3G UMTS.)

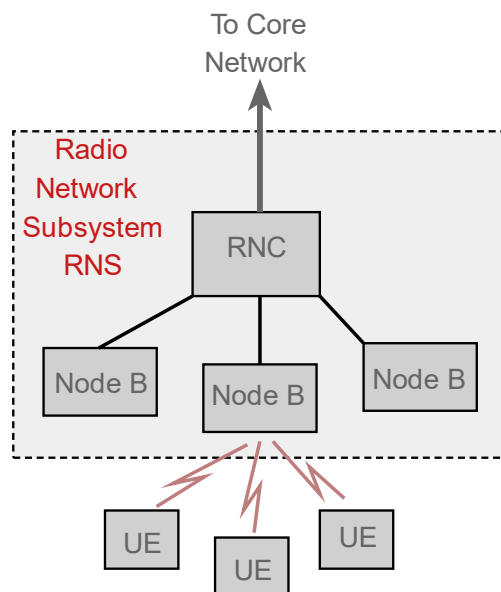
Pakettikytkentäiset elementit on suunniteltu siirtämään suuria määriä pakettidataa. Tämä mahdollistaa nopeamman datasiirron käytön, koska kapasiteetti voidaan jakaa ja data siirretään paketteina. Sekä SGSN- ja GGSN-elementit otettiin käyttöön GPRS-verkoissa, ja ne on siirretty UMTS-verkkoihin. SGSN-elementillä (Serving GPRS Support Node) on useampi toiminto UMTS-runkoverkossa, kuten liikkuvuuden hallinta, istunnon hallinta, viestintä muiden verkon elementtien kanssa ja päätelaitteen laskutus. GGSN-elementti (Gateway GPRS Support Node) käsittelee UMTS-verkon sisäisten pakettikytkentäisien verkkojen ja ulkoisten pakettikytkentäisien verkkojen välistä yhteistyötä. (Poole – 3G UMTS.)

Molempaa menetelmää hyödyntäviin elementteihin kuuluvat HLR, EIR ja AuC. HLR-elementti (Home Location Register) on tietokanta, joka sisältää hallinnollista tietoa jokaisesta käyttäjästä ja niiden viimeisestä tunnetusta sijainnista. Mikäli päätelaite on päällä, mutta ei ole aktiivinen, niin päätelaite rekisteröi sijaintinsa määrääjain, jotta HLR on tietoinen päätelaitteen sen hetkisestä sijainnista. EIR-elementti (Equipment Identity Register) päättää, voiko päätelaitteen sallia verkkoon. Jokaisella päätelaitteella on oma

IMEI-numerosarjansa (International Mobile Equipment Identity), joka tarkastetaan aina, kun päätelaitte rekisteröityy verkkoon. AuC (Authentication Centre) on suojattu tietokanta, joka sisältää yksilöllisen avaimen, joka on myös tallessa päätelaitteen USIM-kortilla (Universal Subscriber Identity Module). (Poole - 3G UMTS.)

4.1.2 UTRAN-radioverkko

UTRAN (UMTS Radio Access Network) on 3G-verkon osa, mikä tarjoaa ja hallitsee ilmarajapintaa. RNC (Radio Network Controller) on osa, mikä hallitsee radioresursseja sille omistetulla alueella NodeB-elementtien muodossa. Tämä osa suorittaa myös datan salauksen ja salauksenpurun. NodeB on 3GPP:n termi UMTS-verkossa olevalle tukiasemalle. Tämä elementti sisältää lähettimen ja vastaanottimen, jotka viestivät päätelaitteiden kanssa omassa solussaan. (Poole – UMTS UTRA.)

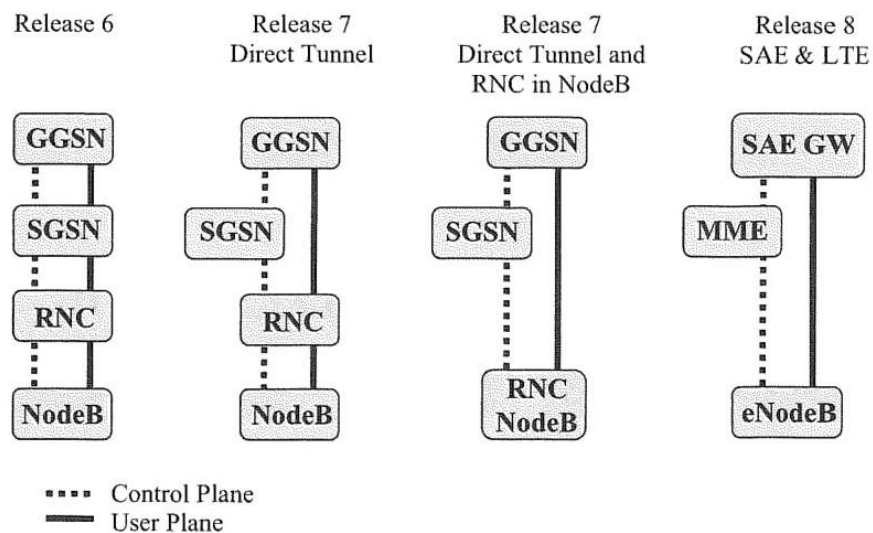


KUVA 11. UTRAN-arkkitehtuuri (Poole – UMTS UTRA)

Kuva 11 esittää UTRAN-verkonosaa UMTS-verkossa. Iu-liitäntä liittää UTRAN:in runkoverkkoon. Iub-liitäntä liittää NodeB- ja RNC-elementit toisiinsa. Iur-liitäntä sallii kommunikoinnin usean RNC:n välillä UTRAN-radioverkon sisällä. (Poole – UMTS UTRA.)

4.2 LTE-verkkojen arkkitehtuuri

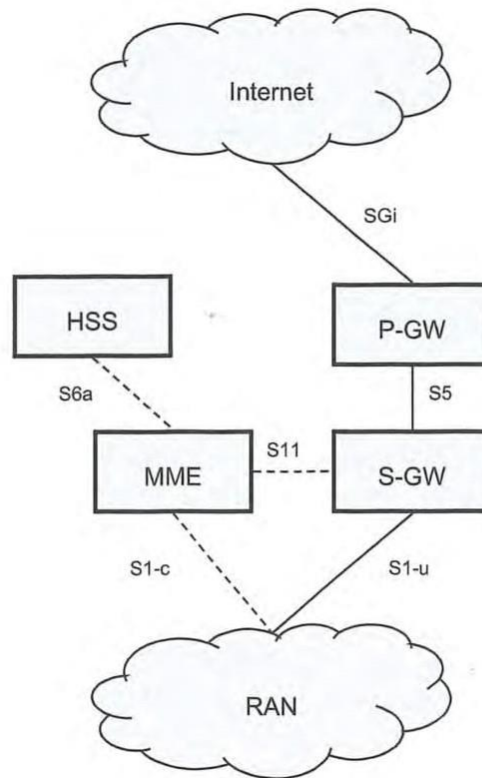
Samalla kun 3GPP työskenteli LTE:n RAN:in (Radio-Access Network) parissa, päätettiin myös uudistaa verkon arkkitehtuuria. Tämä uudistus tunnetaan nimellä SAE (System Architecture Evolution), joka otettiin käyttöön vuonna 2008 standardijulkaisun 8 kanssa. LTE:n RAN-arkkitehtuurista luotiin kuvassa 12 esitetyn standardijulkaisu 8:n mukainen. Verkkoarkkitehtuuri, josta poistettiin ylimääräisiä solmukohtia vähensi viiveitä ja paransi suorituskykyä (Holma & Toskala 2009, 24). EPC on vastuussa toiminnoista, jotka eivät liity radioyhteyksiin, mutta joita tarvitaan täydellisen matkaviestintäverkon tarjoamiseen (Dahlman, Parkvall & Sköld 2016, 55). Näihin toimintoihin sisältyivät mm. autentikointi, laskuominaisuudet ja end-to-end-yhteyksien määrittäminen. Yhdessä E-UTRA ja EPC (Evolved Packet Core) muodostivat EPS:n (Evolved Packet System).



KUVA 12. Arkkitehtuurien kehitys 3GPP:n julkaisuissa (Holma & Toskala 2009, 24)

4.2.1 EPC-runkoverkko

EPC (Evolved Packet Core) on mullistava uudistus edellisestä GPRS-verkkorakenteesta, jota käyttivät GSM-verkot ja WCDMA/HSPA-pohjaiset verkot. Kuva 13 esittää EPC:n rakennetta.



KUVA 13. EPC-runkoverkon arkkitehtuuri (Dahlman, Parkvall & Sköld 2016, 56)

MME-elementti (Mobility Management Entity) on EPC:n pääohjauselementti, mikä on tyypillisesti serveri, joka on sijoitettu turvattuun operaattorin omistamaan tilaan. Tämän ohjauspisteen päätteisiin kuuluvat päätelaitteen autentikointi ja turvallisuus, käyttäjän päätelaitteen sijainnin hallinta ja yhteyden ylläpito. (Holma & Toskala 2009, 28-29.)

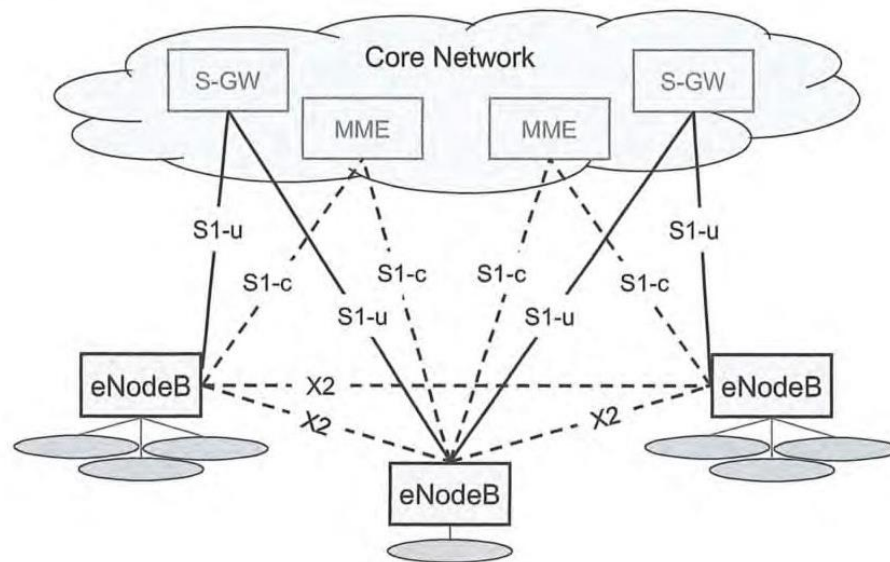
S-GW-elementti (Serving Gateway) on osa, jonka tyypillinen päätoiminto on uplink-suuntaisen pakettidatan kytkentä ja hallinta. Tätä osaa ylläpidetään operaattorin tiloissa. S-GW:llä on todella pieni osuus ohjaustoimintojen kanssa. Päätelaitteen vaihtaessa eNodeB-tukiasemia tämä osa toimii paikallisen liikkuvuuden ankkurina. S-GW myös reitittää dataa eNodeB:n ja P-GW:n välillä. (Holma & Toskala 2009, 29-31.)

P-GW-elementti (Packet Data Network Gateway) toimii EPS:n ja kaikkien ulkopuolisten pakettidataverkkojen välisenä reitittimenä. Tämä osa on korkeimman tason liikkuvuuden ankkuri systeemeissä, ja tyypillisesti toimii käyttäjän päätelaitteen IP-liityntäpisteenä. P-GW allokoi päätelaitteen IP-osoitteen ja päätelaite käyttää sitä muiden IP-osoitteiden kanssa kommunikointiin mm. internetissä. PCEF (Policy and Charging Enforcement Function) sijaitsee tässä osassa verkkoa, ja kyseisen elementin tehtävä on kerätä ja raportoida päätelaitteen toimintaa ja samalla raportoida sopimukseen liittyvät maksutiedot. (Holma & Toskala 2009, 31-32.)

HSS (Home Subscription Service) on kaikkien käyttäjätietojen datavarasto, joka on sijoitettu operaattorin tiloihin. HSS säilyttää alkuperäisen version jokaisen käyttäjän profiilista, jotka sisältävät tietoa sovellettavissa käyttäjään, kuten mitä palveluja sopimuksella on saatavilla. Tämän osan on pystyttävä liittymään mihin tahansa MME-elementtiin missä käyttäjällä on lupa liikkua. Myös AuC (Authentication Center) on osa HSS-elementtiä. (Holma & Toskala 2009, 34.)

4.2.2 E-UTRA-radioverkko

3GPP:n kehittämän uuden EPC-runkoverkon mukana tuli myös tarve uusia radio puolta matkapuhelinverkon arkkitehtuurista, jotta LTE:lle asetetut tekniset vaatimukset saavutettaisiin. Organisaatio kehitti IP-pohjaisen verkkoarkkitehtuurin, jossa käytetään edellisiin verkkoarkkitehtuureihin verrattuna vähemmän solmupisteitä. Radioverkkossa hyödynnetään vain yhden tyyppisiä solmupisteitä, joita kutsutaan nimellä eNodeB. Tämä termi tulee sanoista E-UTRAN Node B tai Evolved Node B. eNodeB on vastuussa kaikista radioon liittyvistä toiminnoista yhdessä tai useammassa solussa. Normaalisti päätelaite on aina yhteydessä yhteen eNodeB:hen. On tärkeää huomioida että eNodeB ei ole suinkaan fyysinen toteutus verkon arkkitehtuurissa, vaan looginen solmupiste. (Dahlman, Parkvall & Sköld 2016, 57.)



KUVA 14. Radio access network -rajapinnat (Dahlman, Parkvall & Sköld 2016, 57)

Kuten kuvasta 14 näkee, eNodeB on yhdistetty EPC:hen käyttäen S1-rajapintaa. S1 user-plane part (S1-u) on liitetty S-GW-rajapintaan ja S1 control-plane part (S1-c) on liitetty MME-rajapintaan. Yksi eNodeB voi olla liitetty useaan S-GW/MME-rajapintaan kuorman jakamisen ja irtisanomisen vuoksi. X2-liitäntä yhdistää eNodeB-elementit toisiinsa, ja käytetään normaalisti aktiivisen tilan liikkuvuuden (engl. *active-mode mobility*) tukemiseen. Tätä liitäntää käytetään myös tukemaan häiriötöntä liikkuvuutta naapurisolujen välillä pakettien välitystä käyttäen. Päätelaitteen ja eNodeB:n välinen liitäntä tunnetaan Uu-rajapintana. (Dahlman, Parkvall & Sköld 2016, 58.)

5 VERTAILU

3GPP:n standardijulkaisujen 7 ja 8 mukaan UMTS-matkapuhelinverkkojen suurimmat teoreettiset datansiirtonopeudet HSPA+ -tekniikkaa käyttäen pystyivät saavuttamaan jopa 28 Mbit/s ja 42,2 Mbit/s nopeudet downlink-suunnassa. Todelliset arvot olivat merkittävästi pienemmät, mutta tarjosivat kuitenkin riittävän downlink-suuntaisen datansiirtonopeuden videon toistamiseen. Tämä oli 3GPP:n askel neljännen sukupolven matkapuhelinverkkojen suuntaan, ilman koko runkoverkon rakentamista uusiksi. Advanced HSPA+ -tekniikka, joka käyttää MIMO-antennitekniikkaa, vaikka eri toteutuksella kuin LTE-verkot, ja 64QAM-modulaatiota, pystyy saavuttamaan downlink-suunnassa jopa 168 Mbit/s nopeuden ja uplink-suunnassa 22 Mbit/s nopeuden.

Ensimmäinen LTE:n versio, joka otettiin käyttöön 3GPP-standardijulkaisun 8 kanssa, tarjosi vaihtelevia datansiirtonopeuksia, mistä suurimmat teoreettiset nopeudet olivat downlink-suunnassa 299,6 Mbit/s ja uplink-suunnassa 75,4 Mbit/s. Kuten HSPA+ -tekniikan kanssa, nämä arvot oli toteutettu ideaalisissa olosuhteissa ja todelliset nopeudet eivät saavuta näitä arvoja. HSPA+ -tekniikka on operaattoreille halpa tapa uudistaa edellisiä verkkoja ja päästä lähemmäs neljännen sukupolven matkapuhelinverkkojen nopeuksia. LTE-verkkojen käyttöönotto on kalliimpaa, koska se vaatii uuden verkon rakentamista. Operaattorit eivät halua jäädä muiden jälkeen kilpailussa ja tietävät LTE:n olevan pidemmällä aikajaksolla parempi investointi. Tämän vuoksi operaattorit pitävät HSPA+ -verkkoja varaverkkoina, joilla pystytään takaamaan peittoalue siellä, missä LTE ei ole vielä käytettävissä.

LTE tarjoaa paremmat tiedonsiirto-ominaisuudet sekä kapasiteetin että nopeuden suhteen, mutta mobiiliverkkona LTE ei pysty kilpailemaan kiinteiden kuituverkkojen ominaisuuksien kanssa. 5G NR -tekniikka tulee toimimaan niin kutsutuilla millimetritaajuuksilla, mikä tarkoittaa itse tiedonsiirtokapasiteetin pystyvän kilpailemaan valokuidun kanssa. Heikkoutena 5G:llä ovat samat millimetritaajuudet, jotka eivät pysty kulkemaan kiinteiden esteiden lävitse tai pitkiä matkoja. Nykyisellä tekniikalla tullaan luultavasti integroimaan 4G- ja 5G-matkapuhelinverkot, jotta saavutetaan 5G:tä käyttäen korkeat tiedonsiirtonopeudet asutuilla alueilla, ja 4G:tä käyttäen laaja peittoalue siellä, missä ei ole vielä mahdollista tai kannattavaa rakentaa uudempiä 5G-verkkoja.

6 POHDINTA

Ihmiskunta on kokonaisuutena siirtymässä aikakauteen, jossa data ja yhteys internettiin ovat kasvavasti tärkeämpiä. Tämä aikakausi mahdollistaa suuremman varmuuden päätöksissä, missä voidaan verrata vanhoihin päätöksiin ja niiden tuloksiin hetkessä. Kaikkea yritetään yhdistää internettiin ja langattomalla datansiirrolla on kasvava kysyntä. Tutkittaessa matkapuhelinverkkojen teknistä kehitystä vuosikymmenien aikana voi huomata selvä trendi. Jokaisen sukupolven matkapuhelinverkossa on haluttu suurempi kapasiteetti, suurempi datan siirtonopeus, vähemmän viivettä ja laajempi kattavuus.

Kolmannen sukupolven matkapuhelinverkot ottivat datansiirron kannalta oikean suunnan, mutta palvelut, joita nämä verkot tarjosivat, olivat vielä puutteellisia. Neljännen sukupolven matkapuhelinverkot alkoivat näyttää lupaavilta, mutta eivät vielä pystyneet siihen, mihin kiinteät yhteydet pystyivät jo kauan ennen 4G-verkkoja. Tulevan viidennen sukupolven matkapuhelinverkon tiedonsiirtonopeus on jo kiinteiden verkkojen kanssa tasoissa, mutta se ei tule korvaamaan kuituverkkoja lähiaikoina lähinnä hitaan käyttönoton ja lyhyen kantavuuden takia.

Matkapuhelinverkkojen arkkitehtuuri on kehittymässä yksinkertaisempiin kokonaisuuksiin samalla kun käytetyt tekniikat monimutkaistuvat. Matkapuhelinverkkojen suorituskyky on kasvanut valtavasti kolmannen sukupolven verkoista eteenpäin, kun todettiin tarve merkittävästi nopeammalle tiedonsiirrolle. Kolmannen sukupolven matkapuhelinverkkoja katsottaessa voi huomata, kuinka ne ovat suuntautuneet tiedonsiirtoon. Toisin kuin aikaisemmissa verkoissa, LTE-verkoista on kasvanut maailmanlaajuisesti käytetty standardi, mikä auttaa järjestöjä keskittymään tämän parantamiseen. 4G-verkoista on kehittynyt langattomille verkoille nopeuden ja yhteyden standardi.

LÄHTEET

3GPP. 2011. SAE. Luettu 17.4.2018.

<http://www.3gpp.org/more/106-sae>

3GPP. 2017. First 5G NR Specs Approved. Luettu 15.4.2018.

http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1929-nsa_nr_5g

3GPP. HSPA. Luettu 17.4.2018.

<http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/99-hspa>

3GPP. LTE. Luettu 14.4.2018.

<http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>

3GPP. Release 15. Luettu 19.4.2018.

<http://www.3gpp.org/release-15>

Casaccia, L. Qualcomm Technologies, Inc. 2017. Understanding 3GPP – starting with the basics. Luettu 14.4.2018.

<https://www.qualcomm.com/news/onq/2017/08/02/understanding-3gpp-starting-basics>

Dahlman, E., Parkvall, S. & Sköld, J. 2016. 4G LTE-Advanced Pro and The Road to 5G, Third Edition. New York City: Elsevier Ltd.

Holma, H. & Toskala, A. 2009. LTE for UMTS – OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access, First Edition. Hoboken: John Wiley & Sons Ltd.

Kavanagh, S. 2017. What is 5G New Radio (5G NR). Luettu 19.4.2018.

<https://5g.co.uk/guides/what-is-5g-new-radio/>

Meraj ud in Mir, M. 2015. Evolution of Mobile Wireless Technology from 0G to 5G. International Journal of Computer Science & Information Technologies, Volume 6, Issue 3. Luettu 12.4.2018.

<http://ijcsit.com/docs/Volume%206/vol6issue03/ijcsit20150603123.pdf>

Poole, I. 3G UMTS Network Architecture. Luettu 18.4.2018.

<https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/3g-umts/network-architecture.php>

Poole, I. LTE OFDM, OFDMA SC-FDMA & Modulation. Luettu 21.4.2018.

<http://www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/lte-long-term-evolution/lte-ofdm-ofdma-scfdma.php>

Poole, I. UMTS UTRA / UTRAN: radio network subsystem RNS. Luettu 19.4.2018.

<https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/3g-umts/radio-access-network-utra-utran.php>

Zellmer, J. Agilent Technologies. 2012. Understanding HSPA+ Cellular Technology. Luettu 26.4.2018.

<http://www.electronicdesign.com/communications/understanding-hspa-cellular-technology>