

Panu Vainio

LTE-verkon integrointi kotitalouksiin ja päivitys 5G-ympäristöön

Opinnäytetyö
Tieto- ja viestintäteknikan koulutus

2019



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tekijä/Tekijät	Tutkinto	Aika
Panu Vainio	Insinööri (AMK)	Joulukuu 2019
Opinnäytetyön nimi		
LTE-verkon integrointi kotitalouksiin ja päivitys 5G-ympäristöön		71 sivua 0 liitesivua
Toimeksiantaja		
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu Oy		
Ohjaaja		
Tomi Pahula		
Tiivistelmä		
<p>Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia, kuinka moderni LTE-mobiiliverkko voidaan integroida kustannustehokkaasti talouksiin kuten omakotitaloihin, käyttämällä rakennuksen olemassa olevia kaapelointeja ilman kallista remontointia, ja rakentaa 1 Gbps:n siirtokykyinen pienverkko omakotitaloomme Tuusulassa. Tarkoituksena oli myös kasvattaa ymmärrystä sekä modernista että uuden sukupolven radioverkosta, ja niihin liittyvistä rajapinnoista ja tiedonsiirtotekniikoista.</p>		
<p>Mobiiliverkkojen merkitys ja määrä maailmassa kasvaa jatkuvasti, kuluttajat vaativat enemmän ja enemmän tiedonsiirtonopeutta päätelaitteille, ja olemassa olevat fyysiset tiedonsiirtotekniikat eivät välttämättä riitä siihen. Työssä korostetaan, kuinka LTE-mobiiliverkon tehokkuutta voidaan lisätä kuluttajien omilla toimilla, sekä esitellään kuinka uuden sukupolven 5G-mobiiliverkko tulee vaikuttamaan mobiililaajakaistojen toimintaan.</p>		
<p>Työn alussa tutkittiin teoreettisella tasolla modernin LTE-verkon toimintaa, siihen liittyviä modulaatiotekniikoita sekä signaalihäiriöitä aiheuttavia tekijöitä. Samalla perehdyttiin uuden sukupolven 5G-mobiiliverkkoon sekä fyysisten tiedonsiirtotekniikojen eroavaisuuksiin.</p>		
<p>Käytännön työ tehtiin omakotitaloon Tuusulassa, missä talon katolla sijaitsevaan tv-mastoon asennettiin ulkoinen ZyXEL LTE7460 -modeemi signaalin vastaanottoa varten. Talon sisätiloihin rakennettiin talon olemassa olevia kaapelointeja hyödyntävä pienikokoinen tietoverkko. Lopuksi mobiiliverkon toimintaa testattiin kahdessa eri skenaariossa, perinteisellä sisätiloissa sijaitsevalla Sagemcom Fast 5370 Air -modeemilla ja katolle asennetulla ulkoisella ZyXEL LTE7460 -modeemilla. Fyysiset tiedonsiirtotekniikat testattiin käyttämällä iPerf3-työkalua ja tietokoneen komentokehoteen ping-komentoa. Testien yhteydessä mobiiliverkon ja eri kaapelitekniikoiden tulokset kirjattiin ylös ja vertailtiin keskenään.</p>		
<p>Työlle asetetut tavoitteet saavutettiin suurimmilta osin onnistuneesti. Uuden sukupolven mobiiliverkon integrointi talouteen jäi tekemättä suuren rahallisen kustannuksen takia. Suunniteltu LTE-verkko saatiin rakennettua ja 1 Gbps:n tiedonsiirtokyky saavutettiin osilla kaapelitekniikoista.</p>		
Asiasanat		
LTE-tekniikka, 5G-tekniikka, laajakaistaverkot, langaton tiedonsiirto, antennit, tietoliikennetekniikka		

Author (authors)	Degree	Time
Panu Vainio	Bachelor of Engineering	December 2019
Thesis title		
LTE household integration and upgrade to 5G environment		71 pages 0 pages of appendices
Commissioned by		
South-Eastern Finland University of Applied Sciences		
Supervisor		
Tomi Pahula		
Abstract		
<p>The primary purpose of this thesis was to study how a modern LTE mobile-network could be cost-efficiently integrated to different households by using the existing cabling that the household already has. This is done to avoid any unnecessary re-modeling costs to the house. Another purpose was to build a small network capable of 1 Gbps transfer-rate across the physical mediums in to our household in Tuusula. The purpose was also to increase understanding about the modern and next generation radio-networks, and about the interfaces and data transmission techniques related to them.</p>		
<p>The importance and amount of mobile-networks continues to steadily grow, consumers demand larger and larger transfer-rates for their end devices, when existing physical mediums may be unable to provide such rates. This thesis highlights how a consumer can increase the performance of his LTE mobile-network, and shows how the next generation 5G mobile-network will impact the operation of mobile broadband services.</p>		
<p>At the beginning of the project was studying the operation of the modern LTE-network, related modulation-techniques and different causes for signal interference. At the same time the next generation 5G mobile-network and different physical transfer mediums became familiar.</p>		
<p>The practical part of the project was done on a detached house located in Tuusula, where a ZyXEL LTE7460 modem was installed on a tv-mast up on the roof of the building for signal receiving. The inside of the house was transformed into a small network by utilizing the houses existing cabling. The performance of the mobile-network was tested with two different scenarios, one with an indoor Sagemcom Fast 5370 Air modem, and one with the outside installed ZyXEL LTE7460 modem. Physical mediums were tested using a tool called iPerf3 and a computers command prompt ping-command. At the end of the project, all test result were written down and compared against each other.</p>		
<p>The goals set for the project were mostly achieved. The planned LTE-network was built successfully, but the 1 Gbps transfer-rates were only achieved by some of the physical mediums. The integration of the next generation mobile-network was not done, due to the high cost of the equipment.</p>		
Keywords		
<p>LTE-technology, 5G-technology, broadband networks, wireless data transfer, antennas, communication technology</p>		

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	8
2	LTE-RADIOVERKKO.....	9
2.1	E-UTRAN.....	9
2.2	EPC	11
3	LTE-LIITYNTÄVERKON LÄHETYTEKNIIKAT	12
3.1	FDD ja TDD	12
3.2	Tukiasemien vastaanotto ja lähetykskaistat	12
3.3	Modulaatiotekniikat	14
3.4	OFDM ja OFDMA	15
3.5	Radiokehys ja resurssilohko	18
3.6	Guard period ja Cyclic prefix.....	19
3.7	Signaalihäiriöt	20
3.8	Kaistanleveys ja Carrier Aggregation.....	25
4	5G.....	27
4.1	NG-RAN	28
4.2	5GC-verkko.....	29
4.3	Massive MIMO ja spatiaalinen multipleksaus	31
4.4	Small Cell	32
4.5	5G-taajuusalueet ja kaistanleveys	34
4.6	5G Carrier Aggregation.....	36
4.7	Beamforming	37
5	KAAPELITEKNIIKAT	38
5.1	Signaalihäiriöt	38
5.2	Ethernet	39
5.3	Koaksiaali	40
5.4	Datasähkö	41

6	IPERF3-TYÖKALU TIEDONSIIRRON ANALYSOINTIIN.....	42
6.1	iPerf3-ohjelma.....	42
6.2	iPerf3-ohjelman ominaisuudet	43
7	LAITTEIDEN TESTAUS JA VERTAILU 800 MHZ:N, 1 800 MHZ:N JA 2 100 MHZ:N TAAJUUSALUEILLA.....	44
7.1	Testattavat laitteet	44
7.2	Testauspaikka, asennus ja olosuhteet.....	44
7.3	Laitteiden testausmenetelmä	46
7.4	Mittaustulokset eri asetuksilla ja taajuusalueilla.....	48
7.5	Päätelmiä ja johtopäätöksiä	54
8	VERKON JAKO JA TESTAUS ERI KAAPELITEKNIKOILLA.....	55
8.1	Käytettävät laitteet ja kaapelointi	55
8.2	Yhteyden jakaminen	56
8.3	Asennus ja kaapelointi.....	57
8.4	Testausmenetelmä	60
8.5	iPerf3- ja ping-mittaustulokset.....	61
8.6	Päätelmiä ja johtopäätöksiä	61
9	YHTEENVETO	62
	LÄHTEET.....	65
	KUVALUETTELO	68
	TAULUKKOLUETTELO	71

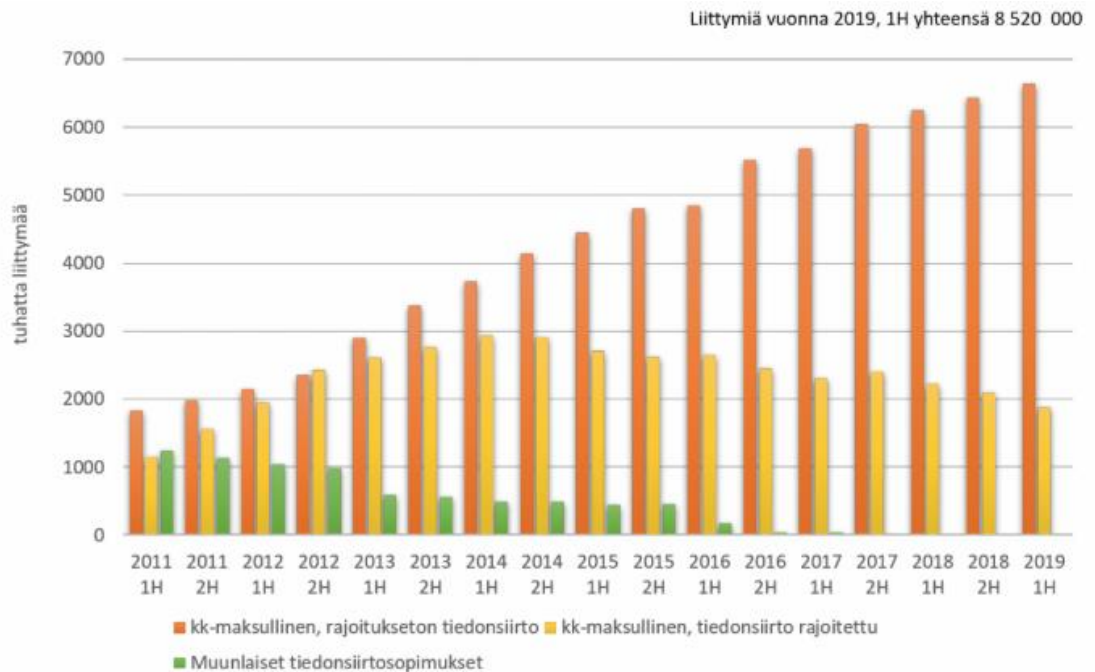
LYHENNELUETTELO

AMF	Access and Mobility Management Function
AUSF	Authentication Server Function
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CA	Carrier Aggregation
CC	Component Carrier
CP	Cyclic Prefix
DL	Download
eNB	evolved NodeB
en-gNB	Secondary eNodeB
EPC	Evolved Packet Core
E-UTRAN	Evolved Universal Terrestrial Access Network
FDD	Frequency Division Duplex
FR	Frequency Range
gNB	Next Generation NodeB
GSM	Global System for Mobile communications
HSS	Home Subscriber Server
IoT	Internet of Things
IPV	Internet Protocol Version
ISI	Inter Symbol Interference
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution Advanced
MeNB	Master eNodeB
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MME	Mobile Management Entity
MoCA	Multimedia over Coaxial Adapter
ng-eNB	enhanced 4G base station
NG-RAN	Next Generation Radio Access Network
NR	New Radio
NSA	Non-Standalone
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PBCH	Physical Broadcast Channel

PDN / P-GW	Packet Data Network Gateway
PL	Propagation Loss
PLC	Poweline Communications
PoE	Power over Ethernet
PSS	Primary Synchronization Signal
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RAN	Radio Access Network
RB	Resource Block
RSRP	Reference Signal Received Power
RSRQ	Reference Signal Received Quality
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SA	Standalone
S-GW	Serving Gateway
SINR	Signal-to-Interference plus Noise Ratio
SISO	Singe Input Single Output
SMF	Session Management Function
SNR	Signal to Noise Ratio
SSB	Synchronization Signal Block
SSS	Secondary Synchronization Signal
STP	Shielded Twisted Pair
TCP	Transmission Control Protocol
TDD	Time Division Duplex
UE	User Equipment
UL	Upload
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UPF	User Plane Function
UDM	Unified Data Management
UDP	User Datagram Protocol
UDR	Unified Data Repository
UTP	Unshielded Twisted Pair
3GPP	3rd Generation Partnership Program
5GC	5G Core Network

1 JOHDANTO

Mobiililaajakaistaliittymien määrä Suomessa on kasvanut tasaisesti jo monen vuoden ajan, eikä loppua näytä tulevan. Uusien päätelaitteiden ja IoT-sovellustusten (Internet of Things) myötä ihmiset tarvitsevat enemmän ja enemmän langattomia laajakaistoja laitteillaan, varsinkin Suomessa, missä valokuituinfrastruktuuri ei ole leviittänyt vielä niin laajalle. Mobiililaajakaistoilla pyritään korvaamaan vanhoja kiinteitä internetyhteyksiä, joissa latausnopeudet voivat olla huomattavasti alhaisemmat kuin moderneissa mobiililiittymissä. Mobiililaajakaistaliittymien määrä vuoden 2019 kesäkuun lopussa oli 8,520 miljoonaa. Kasvua edellisestä vuodesta oli noin prosentti. Liittymistä 75 prosenttia (6,360 miljoonaa) oli kotitalouksissa. Kuvassa 1 näemme vielä havainnollistuksen mobiililiittymien kasvusta kuuden kuukauden (1H) välein vuodesta 2011 nykyhetkeen (2019) asti.



Kuva 1. Mobiililaajakaistaliittymät Suomessa tiedonsiirtosopimuksen mukaan (Ficom 2019)

Mobiiliverkolla on kuitenkin omat haittapuolensa. Mikäli mobiililaite sijaitsee kaukana palvelevasta tukiasemasta tai kärsii muuten suuresta määrästä signaalihäiriötä, on laitteen yhteys todennäköisesti huono eikä latausnopeudet vastaa luvattua määrää. Yhteyttä voidaan kuitenkin parantaa ulkoisien antennien käytöllä ja kantoaaltojen yhdistämisellä.

Uuden sukupolven mobiiliverkon (5G) tekniikoiden kautta pyritään tiputtamaan pois mobiiliverkon perinteisimpiä ongelmia, joita kiinteässä verkossa ei välttämättä ole, kuten pidempi vasteaika ja alhaisemmat datakapasiteetit. 5G pyrkii saavuttamaan päätelaitteille 1 ms:n vasteajan sekä yli 1Gbps:n nopeudet. Tämä on valokuitulaajakaistojen suorituskyvyn kanssa jo hyvin samankaltainen ja huomattava parannus verrattuna LTE-verkon suorituskykyyn.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on pyrkiä parantamaan kuluttajille tarjottua mobiililaajakaistan toimintaa perehtymällä mobiiliverkon toimintaan, sen radorajapintaan sekä rakentamalla kuluttajaratkaisuja tehokkaampi mobiiliverkkoon pohjautuva pienverkko. Tavoitteena on tuoda esille niitä tekijöitä, jotka vaikuttavat yhteyden toimintaan ja laatuun, jotta nämä tekijät voidaan ottaa huomioon verkon tehokkuuden optimoimisen yhteydessä. Tarkoituksena on siis selvittää, kuinka tehokas vaihtoehto mobiiliverkko on kiinteälle yhteydelle? Kuinka mobiiliverkon tehokkuus maksimoidaan? Ja poistaako 5G kotitalouksien tarpeen kiinteille yhteyksille?

Toisena tavoitteena on kehittää verkosta kustannustehokas ja helposti 5G-verkkoon päivitettävä. Verkko toteutetaan käyttämällä ulkoista modeemia ja integroimalla se adaptereita ja rakennuksen olemassa olevaa kaapelointia käyttäen talon sisäiseen tiedonsiirtoverkkoon. Näin yhteys saadaan jaettua ympäri taloutta ilman kallista remontointia, jossa talon kaapelointi päivitettäisiin kauttaaltaan.

Tutkimusmenetelmäksi työlle valikoitui toiminnallinen työ. Kyse on siis toimintaoppimisesta, joka on tärkeä ammattillinen vahvuus nykymaailmassa. Näin pystytään kerryttämään mahdollisimman paljon teoriaosaamista sekä käytännön kokemusta radioverkoista ja siihen liittyvistä rajapinnoista, kun työ toteutetaan itse käytännössä.

2 LTE-RADIOVERKKO

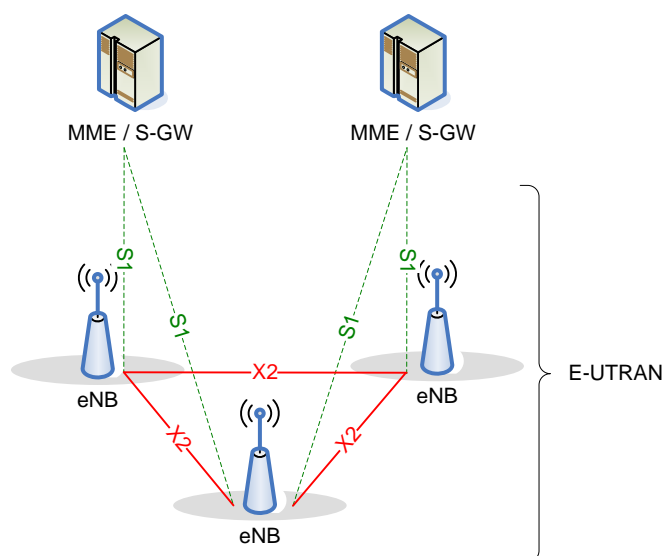
2.1 E-UTRAN

E-UTRAN-verkko (Evolved Universal Terrestrial Access Network) koostuu useista tukiasemista (evolved NodeB, eNB), jotka ovat yhteydessä toisiinsa X2-

rajapinnan kautta. X2-rajapinta koostuu tukiasemien välisistä valokuitulinkeistä, jota kautta tietoliikenne eri tukiasemien välillä kulkee. Tämä muodostaa LTE-liityntäverkon, yleisimmin radioliityntäverkko (Radio Access Network, RAN).

LTE-verkon päätelaitteet muodostavat yhteyden itse päätelaitteen ja palvelevan tukiaseman välille. Tukiaseman ja päätelaitteen (User Equipment, UE) välistä rajapintaa kutsutaan Uu:ksi. eNB-tukiasemilla ei ole omaa ohjausyksikköä kuten 3G-verkon tukiasemilla oli, vaan ne ohjaavat itse myös alhaisen tason operointia verkossa. eNB-tukiasemat lähettävät mobiililaitteille tukiaseman vaihtoon liittyviä signaaleja toimien osittain verkon "älynä" ja täten dramaattisesti nopeuttaen yhteyden muodostamista ja vaihtoa tukiasemien ja päätelaitteen välillä.

E-UTRAN-verkko on yhteydessä EPC-runkoverkkoon (Enhanced Packet Core) S1-rajapinnan kautta. Komponentit kuten liikkuvuuden hallinta kokonaisuus (Mobile Management Entity, MME) ja palveleva yhdyskäytävä (Serving Gateway, S-GW) ovat suorassa yhteydessä E-UTRAN-verkkoon. (Rohde & Schwarz 2012, 45.) S1-rajapinta, kuten X2-rajapintakin, koostuu myös valokuitulinkeistä. Kuva 2 havainnollistaa E-UTRAN-verkon arkkitehtuuria.



Kuva 2. E-UTRAN-verkon arkkitehtuuri (3GPP TS 36.300 2019, 31)

2.2 EPC

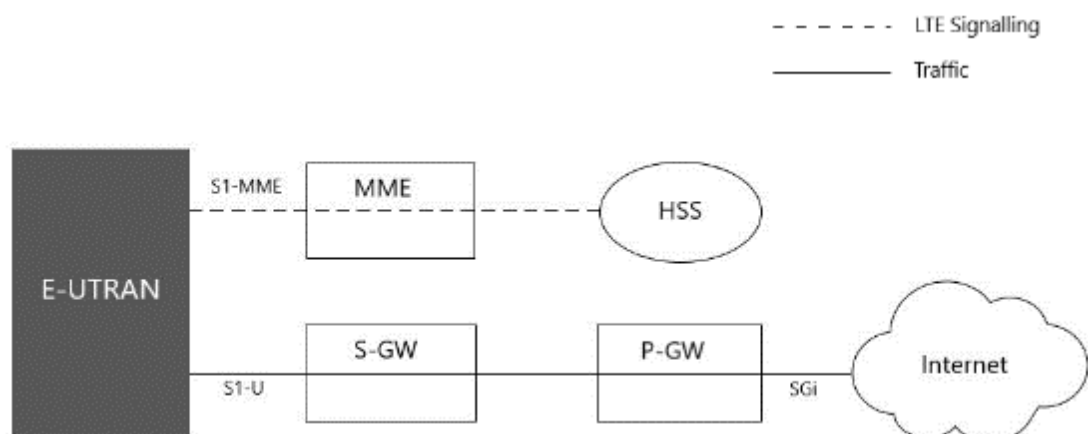
EPC-verkko koostuu useista eri komponentista, jota kautta E-UTRAN-liityntäverkon yhteydet kulkee ennen kuin liikenne kulkee kohti julkista internetiä. Ensimmäisenä E-UTRAN-verkosta tullessa vastassa on runkoverkon palveleva yhdyskäytävä S-GW ja liikkuvuuden hallintakokonaisuus MME.

MME ohjaa EPC-verkon liikkuvuuden korkean tason operointia lähettämällä sille signaaloivia viestejä verkon turvallisuuteen tai radio kommunikaatioon liittymättömistä datavirroista. (Cox 2014, 26.)

S-GW toimii runkoverkon korkean tason reitittimenä, joka välittää dataa tukiaseman ja PDN-yhdyskäytävän (Packet Data Network Gateway, P-GW) välillä. (Cox 2014, 26.)

HSS (Home Subscriber Server, HSS) on keskitetty tietokanta, joka sisältää informaatiota jokaisesta palveluntarjoajan asiakkaasta. Tämä on yksi harvoista komponenteista, joka säilyi vanhasta UMTS-verkosta (Universal Mobile Telecommunications System) ja GSM-verkosta (Global System for Mobile communications). (Cox 2014, 25.)

P-GW on EPC-verkon kontaktipiste julkiseen internetiin. SGi-rajapinnan kautta jokainen PDN-yhdyskäytävä vaihtaa dataa yhden tai useamman ulkoisen laitteen kanssa, kuten palveluntarjoajan palvelimien, internetin tai IP multimedia -alijärjestelmien kanssa. (Cox 2014, 25.) Kuva 3 havainnollistaa EPC-verkon eri komponentteja.

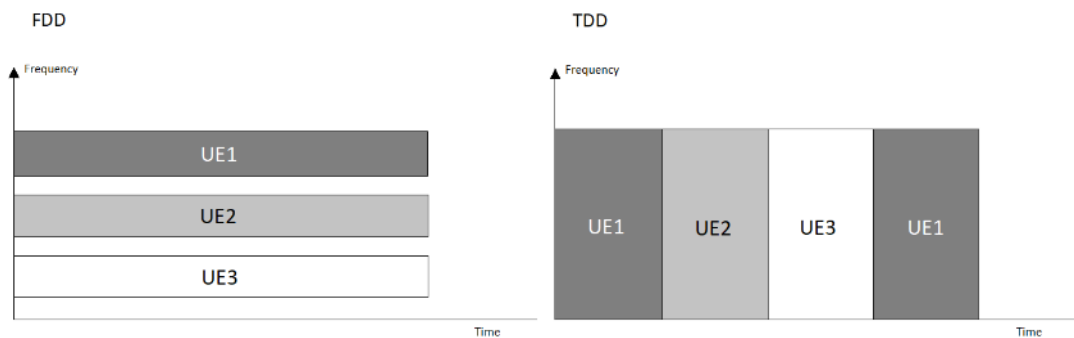


Kuva 3. EPC-verkon pääkomponentit

3 LTE-LIITYNTÄVERKON LÄHETYTEKNIIKAT

3.1 FDD ja TDD

LTE-verkossa käytetään taajuusjakoista FDD-tekniikkaa (Frequency Division Duplex) ja TDD-tekniikkaa (Time Division Duplex) uplink- ja downlink-lähetys-suuntien erottamiseen. FDD-tekniikassa vastaanotin ja lähetin toimivat eri kanta-aaltopituuksilla. TDD-tekniikalla vastaanotin ja lähetin ovat yhteydessä toisiinsa samalla taajuudella, mutta liikenne laitteiden välillä jaetaan aikajaksosiksi ruuhkautumisen välttämiseksi. Kuva 4 havainnollistaa taajuusjakoisen ja aikajakoisen liikenteen jaottelun.



Kuva 4. FDD- ja TDD-tekniikojen periaate

3.2 Tukiasemien vastaanotto ja lähetykskaistat

E-UTRAN-verkko käyttää useita eri kaistanleveyksiä yhteyksissään. 3GPP (3rd Generation Partnership Project), joka luo matkapuhelinjärjestelmille maailmanlaajuisia standardeja ja teknisiä määrittelyjä, on määrittänyt kanta-aaltojen kaistanleveydet 1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz ja 20 Mhz käytettäviksi LTE-verkossa.

Taulukossa 1 on suomalaisten operaattorien käyttämät lähetystaajuudet E-UTRAN-verkossa, ja tulevaisuudessa myös 5G-verkossa. Suomessa LTE-verkko toimii taajuusjakoisella tekniikalla. Huomattavaa on, että matalammilla taajuuksilla luvan haltijat ovat saaneet käyttöönsä vain 10 MHz:n kaistanleveyden, kun taas korkeammilla taajuuksilla luvan haltijat ovat saaneet käyttöönsä 20 MHz:n kaistanleveyden.

Taulukko 1. Matkaviestinverkkojen taajuudet ja luvanhaltijat Suomessa (Traficom 2019)

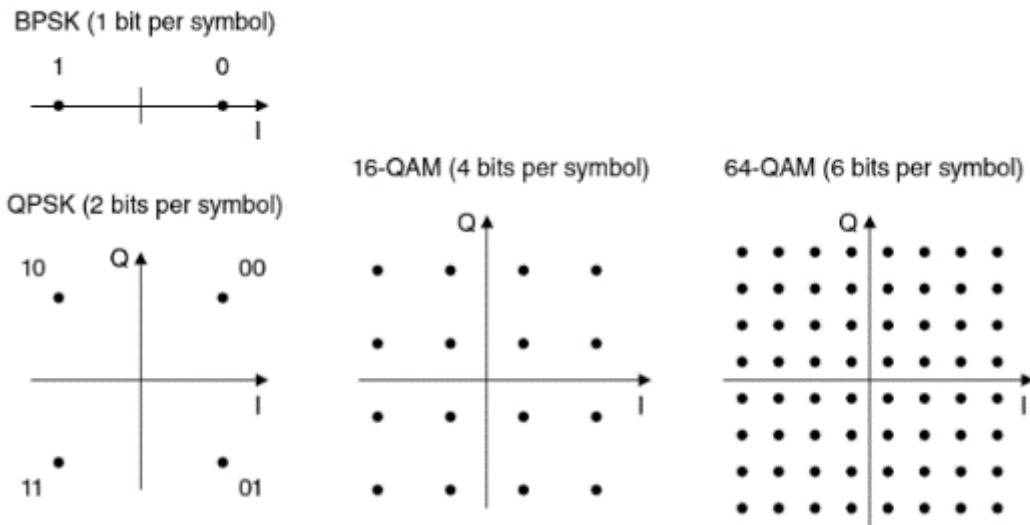
f DL (MHz)	f UL (MHz)	Operaattori
703 - 713	758 - 768	DNA
713 - 723	768 - 778	Elisa
723 - 733	778 - 788	Telia
832 - 842	791 - 801	DNA
842 - 852	801 - 811	Telia
852 - 862	811 - 821	Elisa
880,1 - 891,7	925,1 - 936,7	DNA
891,9 - 903,3	936,9 - 948,3	Telia
903,5 - 914,9	948,5 - 959,9	Elisa
1710,1 - 1734,9	1805,1 - 1829,9	Telia
1735,1 - 1759,9	1830,1 - 1854,9	DNA
1760,1 - 1784,9	1855,1 - 1879,9	Elisa
1920,3 - 1940,1	2110,3 - 2130,1	Elisa
1940,1 - 1959,9	2130,1 - 2149,9	DNA
1959,9 - 1979,7	2149,9 - 2169,7	Telia
2500,0 - 2520,0	2620,0 - 2640,0	DNA
2520,0 - 2545,0	2640,0 - 2665,0	Telia
2545,0 - 2570,0	2665,0 - 2690,0	Elisa
2570,0 - 2620,0	2570,0 - 2620,0	Elisa
3410 - 3480	3410 - 3480	Telia
3600 - 3660	3600 - 3660	Telia
3480 - 3540	3480 - 3540	Elisa
3660 - 3730	3660 - 3730	Elisa
3540 - 3600	3540 - 3600	DNA
3730 - 3800	3730 - 3800	DNA

Suomessa pääasialliset taajuusjakoiset taajuudet ovat numeroitu taulukon 2 mukaisesti.

Taulukko 2. LTE taajuuskaistojen numerointi eri taajuusalueille

B1	2100 MHz
B3	1800 MHz

modulaatiotekniikoita datan lähettämiseen. Kuvassa 6 näemme eri modulaatio kaavat havainnollistettuna.

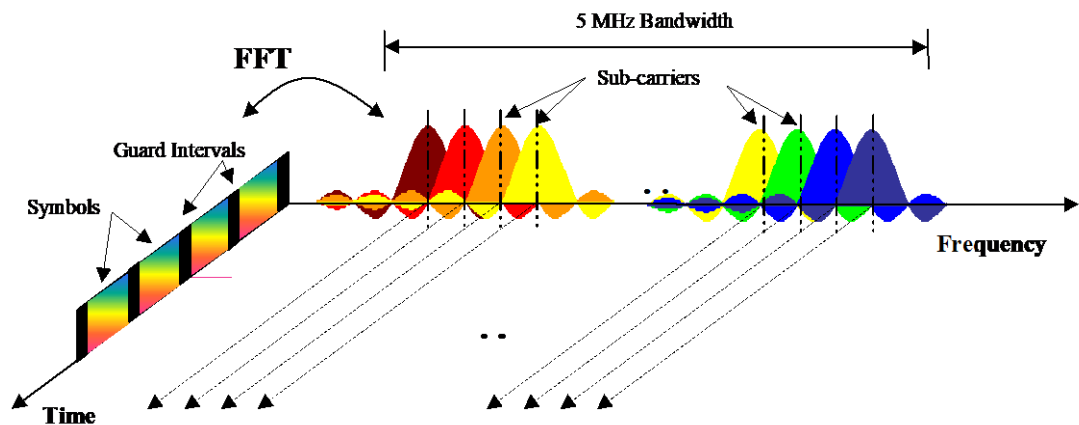


Kuva 6. LTE:n käyttämät modulaatiotekniikat (Cox 2014, 51)

LTE-A (Long Term Evolution-Advanced) käyttää lisäksi vielä 256-QAM-modulaatiota, jossa bittejä lähetetään kahdeksan kerrallaan käyttäen 256 eri symbolia.

3.4 OFDM ja OFDMA

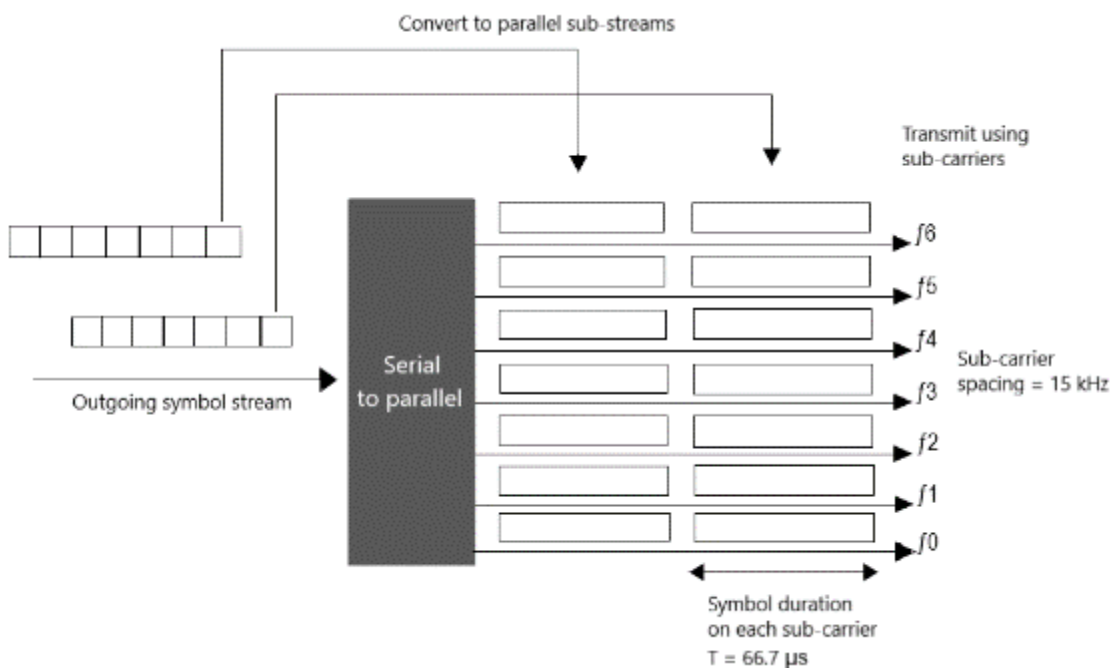
Päätelaitteiden määrän kasvaessa jatkuvasti mobiiliverkossa tulee tarve luoda uusia modulaatiotekniikoita, joilla varmistetaan signaalin tehokkaampi jaettavuus useammalle päätelaitteelle samanaikaisesti. OFDM-modulaatio (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) on LTE-verkon käytössä oleva modulaatiotekniikka. OFDM-tekniikassa käytettävälle taajuusalueelle lähetetään yhden kantoaallon sijaan useita alikantoaaltoja, jotka ovat keskenään ortogonaalisia, eivätkä täten häiritse toisiaan. LTE-lähetystekniikka FDD- ja TDD-jaolla downlink-suunnassa perustuu perinteiseen OFDM-modulaatioon. (Rohde & Schwarz 2012a, 10.) Kuva 7 havainnollistaa OFDM-tekniikan toimintaperiaatetta.



Kuva 7. OFDM-modulaation periaate (3GPP TR 25.892 2004, 10)

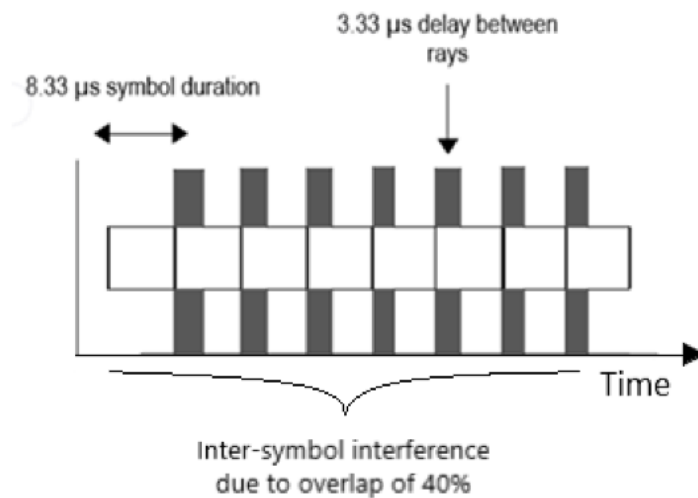
OFDMA-tekniikka (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) mahdollistaa taajuuksien samanaikaisen käytön sekä aika- että taajuustasolla.

OFDM-modulaatiossa lähetin ottaa lohkon symboleita ulospäin suuntaavasta informaatiovirrasta ja lähettää jokaisen symbolin eri radiotaajuudella eli alikantaaalloilla (Sub Carrier). Jokaisen yksittäisen alikantaaallon kaistanleveys on 15 kHz, minkä takia se pystyy tukemaan vain pieniä symbolimääriä. Kollektiivisesti alikantaaallot pystyvät kuitenkin samaan kaistanleveyteen kuin yksi perinteisesti suurempi kaistanleveys. (Cox 2014, 67.) Kuva 8 havainnollistaa lohkon jakamista alikantaaalloiksi käyttämällä OFDM-modulaatiota.



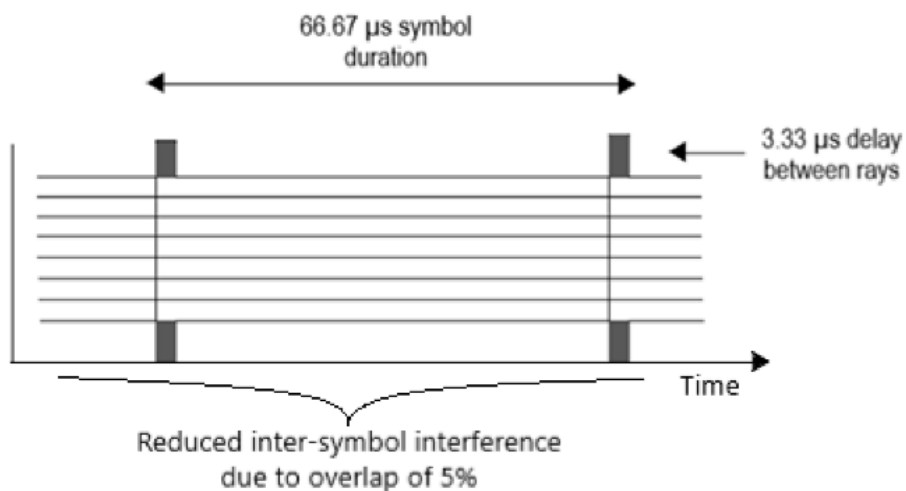
Kuva 8. Esimerkki taajuuskaistan jaosta alikantaaalloiksi OFDM-tekniikassa

Tämän tekniikan avulla voidaan hajauttaa esimerkiksi 1 MHz:n kaistanleveys sataan kappaleeseen 10 kHz:n kaistanleveyttä, ja siten vähentää symbolien välistä häiriön (Inter Symbol Interference, ISI) määrää. Aikatasossa jokaisen symbolin väliin on lisätty suojaväli (guard period) vasteajan jakautumisen (delay spread) vähentämiseksi. Kuva 9 havainnollistaa kuinka suuresta kaistanleveydestä seuraa prosentuaalisesti suuria jakaumia aiheuttaen symbolien välistä häiriötä.



Kuva 9. Esimerkki symbolien välisestä häiriöstä

Kuva 10 havainnollistaa alikantoaaltojen tuomaa vaikutusta symbolien välisen häiriön vähentämiseksi.

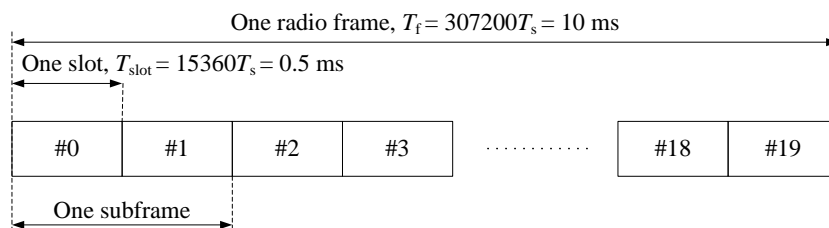


Kuva 10. Symbolien välisen häiriön väheneminen alikantoaaltoja käytettäessä

3.5 Radiokehys ja resurssilohko

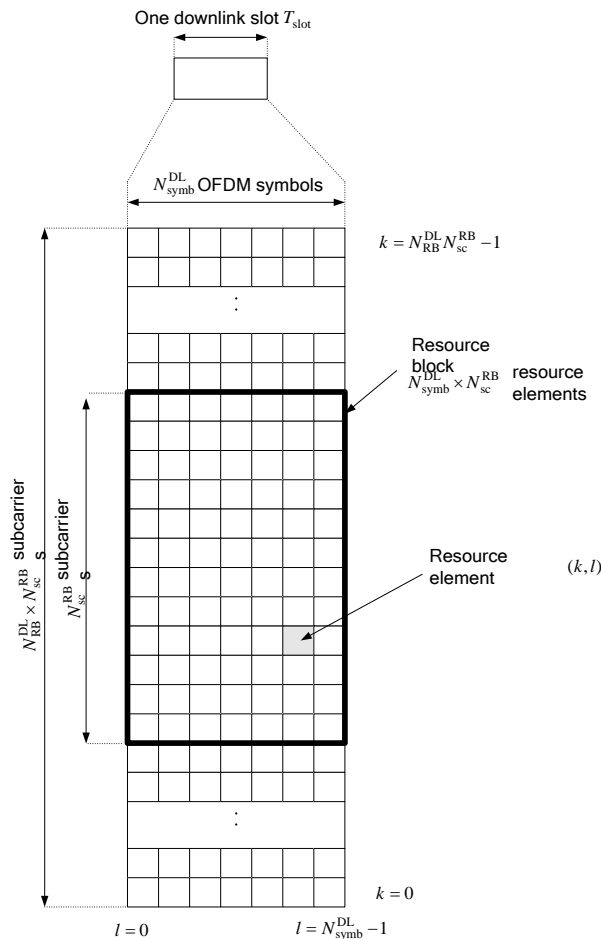
E-UTRAN-verkossa on kahdenlaisia radiokehkyksiä. FDD-tekniikassa on ykköstyypin radiokehys on viiveltään 10 ms pitkä. TDD-tekniikassa vuorostaan on kaksi 5 ms:n puolikehystä.

Tyyppin 1 radiokehys jaetaan kymmeneen 1 ms:n pituiseen alikehykseen. Alikehykset ovat vuorostaan jaettu kahteen 0,5 ms:n alilohkoon. Yhteen aikalohkoon mahtuu 7–6 symbolia yhtä alikantoaaltoa kohden riippuen suoja-
välin pituudesta. (Rohde & Schwartz 2012a, 12.)



Kuva 11. Ykköstyypin kehyksen rakenne (3GPP TS 36.211 2019, 16)

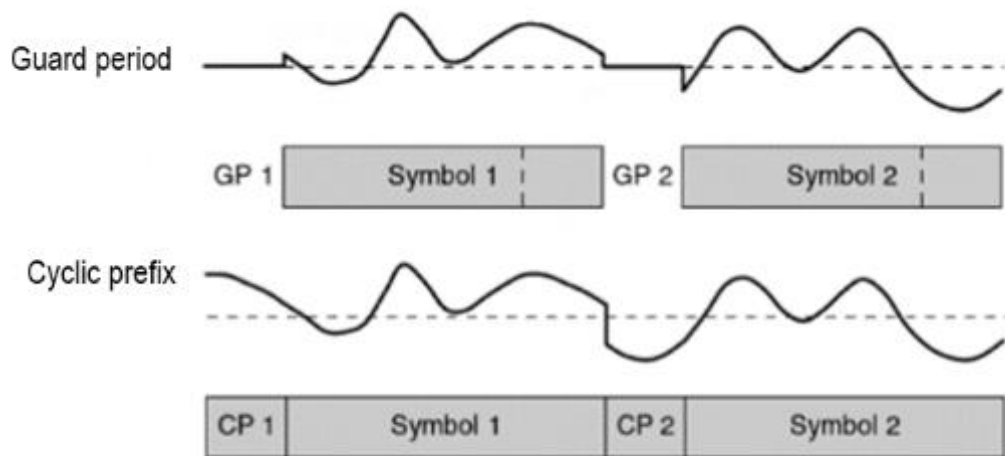
Resurssilohko koostuu 12:sta resurssielementtejä sisältävistä alikantoaalloista ja yhdestä 0.5 ms:n aikalohkosta. Yhden resurssilohkon koko on kokonaisuudessaan 180 kHz:n kokoinen taajuustasolla sekä 0,5 ms:n pituinen aikatasolla. Kuva 12 havainnollistaa vielä resurssilohkon periaatetta.



Kuva 12. Resurssilohkon periaate (3GPP TS 36.211 2019, 99)

3.6 Guard period ja Cyclic prefix

Suojaväli (Guard period), jossa mitään ei lähetetä ennen seuraavaa symbolia, on ollut toimiva ratkaisu symbolien välisen häiriön vähentämiseksi radioverkoissa. LTE käyttää samankaltaista tekniikkaa nimeltään syklisen prefiksin lisääminen (Cyclic prefix insertion, CP). Cyclic prefix on paranneltu versio suojavälistä, missä symbolien välisen tyhjyyden sijaan väli täytetään kopiaamalla seuraavan symbolin alusta pätkä, joka liitetään osaksi symbolijonoa. Näin varmistetaan lähetettävän signaalin sulava vaihto symbolista toiseen, ja symbolivaihdosta syntyvä häiriö saadaan minimoitua. Kuva 13 havainnollistaa vielä suojavälin ja syklisen prefiksin toimintaa.



Kuva 13. Suojavälin ja syklisen prefiksin periaate

3.7 Signaalihäiriöt

Kuten symbolien välinen häiriö, signaalin voimakkuuteen ja selvyyteen vaikuttaa moni asia. LTE-verkon kehityksen myötä ISI on saatu paljolti minimoitua, mutta mobiiliverkon lähetystekniikan toiminta kohtaa vieläkin huomattavasti haasteita.

Propagaatiohävikki (Propagation Loss, PL) on langattoman kommunikaation perinteisin ja yleisin ongelma. Langattomassa kommunikaatiojärjestelmässä signaali hajaantuu kulkiessaan lähettimestä vastaanottimeen, jossa vastaanotettu teho (PR) on vähemmän kuin lähetetty teho (PT). (Cox 2014, 58.) Idealisessa tilanteessa signaalin hävikki suhteessa lähetettyyn tehoon on 1–2, jossa jokainen etäisyyden yksikkö puolittaa signaalin voimakkuuden. Hävikin määrä voidaan laskea yhtälöstä 1.

$$PL = \frac{PT}{PR} \quad (1)$$

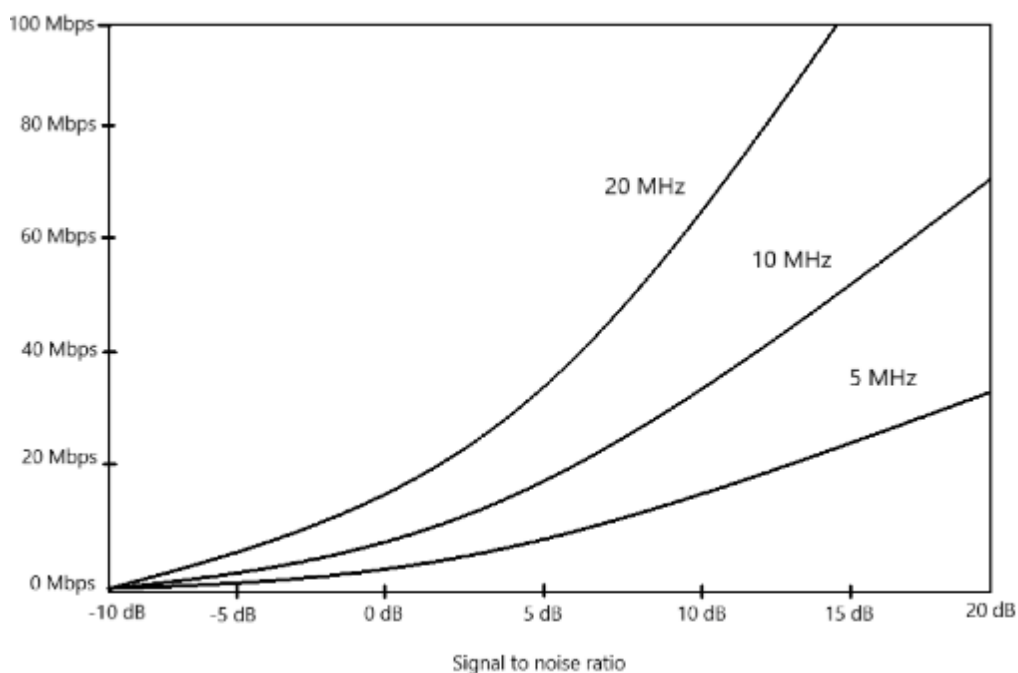
jossa

PL	Propagation Loss
PT	Power Transmitted
PR	Power Received

Mobiiliverkossa signaali voi kuitenkin heikentyä ja heijastua eri rakenteista ja esteistä kuten rakennuksista tai maaperästä. Kokeellisesti on todettu, että realistisissa olosuhteissa propagaatiohävikki mobiiliverkossa on suhteessa lähetettyyn tehoon välillä 3,5–4,0. (Cox 2014, 58.)

PL itsessään ei kuitenkaan ole suuri ongelma LTE-verkon yhteyksissä, mutta kohina ja häiriö muista lähettimistä ja sähkölaitteista ovat. Tämän takia mobiiliverkon vastaanotin joutuu usein uudelleenrakentamaan vastaanotetut bitit kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa vastaanotin käyttää sen arviota tulevien symbolien voimakkuudesta ja vaiheesta tehdäkseen pehmeän päätöksen (soft decision) siitä, onko bitti 1 vai 0. Toisessa vaiheessa vastaanotin tekee vielä kovan päätöksen (hard decision), jolla se päättää lopullisesti onko bitti 1 vai 0. (Cox 2014, 58.)

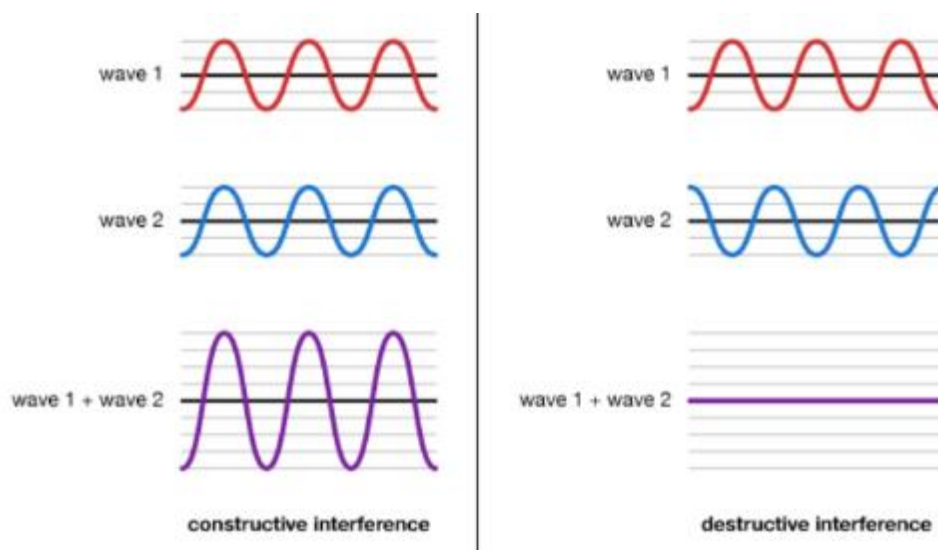
Jos kohina ja häiriö on tarpeeksi suurta, voi vastaanotin erehtyä bitin luonteesta, jonka seurauksena vastaanotin voi tuottaa bittivirheitä (bit errors). Bittivirheiden määrä riippuu signaali-kohina-suhteesta (Signal-to-interference plus noise ratio, SINR, SNR). Nopeassa modulaatiotekniikassa kuten 64-QAM, signaalia voidaan lähettää suuremmissa määrissä ja monella eri tavalla käyttäen kuvion eri tiloja. Tämän seurauksena 64-QAM-modulaatio on alttiimpi bittivirheille ja sitä voidaan käyttää vain jos SINR on tarpeeksi korkea. Vastakohtana QPSK:lla on vain muutama eri tila ja on täten vähemmän altis bittivirheille. QPSK:ta voidaan siten käyttää heikommalla signaalikohinasuhteella. (Cox 2014, 58.) LTE hyväksikäyttää näitä tekniikoita vaihtelemalla 64-QAM:n, 16-QAM:n ja QPSK:n välillä riippuen signaalikohinasuhteesta. Kuva 14 havainnollistaa vielä signaalikohinasuhteen vaikutusta yhteyden latausnopeuteen.



Kuva 14. Signaalikohinasuhteen vaikutus latausnopeuteen eri kantaaltojen kaistanleveyksillä

Signaali voi heijastumisen takia kulkea kimpoilemalla useampaa eri polkua päätepisteeseensä verrattuna ideaalissa tilanteessa tyhjän ilmatien kautta kulkevaan signaaliin. Tätä ilmiötä kutsutaan Multipathiksi. (Cox 2014, 58) Multipathissa signaali voi kulkea rakennuksien läpi tai maaston kautta. Multipath aiheuttaa enemmän signaalin heikkenemistä ja tehon alenemista mitä pidempiä ja monimutkaisempia reittejä signaali joutuu kulkemaan.

Säteet voivat kulkea samalla taajuusalueella eri tavoin. Jos säteiden kulku vastaa toisiaan, tilanne tunnetaan rakentavana häiriönä (constructive interference). Mutta jos säteet kulkevat vastakkain toisiinsa nähden, on seurauksena tuhoavaa häiriötä (destructive interference). Tuhoava häiriö voi saada vastaanotettavan signaalin tehon tippumaan hyvin alhaiselle teholle, mikä tunnetaan signaalin haalistumisena (fading). Virheiden määrän kasvun takia signaalin haalistuminen on vakava ongelma mobiiliverkoissa. (Cox 2014, 59.) Fading ilmenee vakavasti ruuhkautuneissa verkoissa, jossa useat päätelaitteet toimivat samalla alueella, kuten kaupungeissa. Kuvassa 15 näemme rakentavan ja tuhoavan häiriön vaikutukset signaalin laatuun.



Kuva 15. Rakentavan ja tuhoavan häiriön vaikutus vastaanotettavaan signaaliin (Encyclopedia Britannica s.a)

Signaalin laatua voidaan mitata erilaisilla päätelaitteilla kuten reitittimellä tai modeemilla tarkastamalla laitteen käyttöliittymästä vastaanotetut signaaliarvot. Signaalikohinasuhde (Signal to Noise Ratio, SNR), vastaanotettavan referanssisignaalin laatu (Reference Signal Received Quality, RSRQ), vastaanotettavan referanssisignaalin teho (Reference Signals Received Power, RSRP) ja vastaanotettavan signaalin voimakkuus (Received Signal Strength Indicator, RSSI) ovat yleisimmät mittaustulokset, joita päätelaitteet tuottavat signaalin tasosta. Mittaustulokset ovat desibeliasteikolla, mitä suurempi positiiviseen suuntaan oleva arvo, sen parempi yhteys. Taulukot 3–6 havainnollistavat RSRP:n, RSRQ:n, SNR:n ja RSSI:n vaikutusta yhteyteen.

Taulukko 3. RSRP:n arviointi (RSRP. LTE-Anbieter s.a)

RSRP	Arvosana	Kommentti
-50... -65 dBm	1 (erittäin hyvä)	Erinomainen vastaanotto.
-65... -80 dBm	2 (hyvä)	Hyvä, riittävät vastaanotto-olosuhteet.
-80... -95 dBm	3 (tydyttävä)	Riittävät vastaanotto-olosuhteet vakaa- seen yhteyteen.
-95... -105 dBm	4 (riittävä)	Riittävät vastaanotto-olosuhteet vakaa- seen yhteyteen, mutta datanopeus rajoit- tettu. Yhteyden pätkiminen mahdollista.
-105... -125 dBm	5 (huono)	Heikko, toimenpiteitä tarvitaan. Yhteys epävaka.
-125... -140 dBm	6 (riittämätön)	Erittäin huono, yhteyttä ei voi muodos- taa.

Taulukko 4. RSRQ:n arviointi (RSRQ. LTE-Anbieter s.a)

RSRQ	Arvosana	Kommentti
-3 dB	1 (erittäin hyvä)	Optimaalinen yhteys, ei häiriötä.
-4... -5 dB	2 (hyvä)	Pientä häiriötä, ei vaikutusta.
-6... -8 dB	3 (tyytyttävä)	Kohtalaista häiriötä, vähäinen vaikutus.
-9... -11 dB	4 (riittävä)	Suurta häiriötä, huomattava vaikutus yhteyteen.
-12... -15 dB	5 (huono)	Voimakasta häiriötä, yhteys epävaka.
-16... -20 dB	6 (riittämätön)	Erittäin suurta häiriötä, yhteyden muodostaminen mahdotonta.

Taulukko 5. SNR:n arviointi (SNR. LTE-Anbieter s.a)

SNR	Arvosana	Kommentti
+40... +20 dB	1 (erittäin hyvä)	Erinomaiset olosuhteet, ei häiriötä.
+19... +10 dB	2 (hyvä)	Hyvä, vakaa signaali, vähäinen häiriö.
+9... +5 dB	3 (tyytyttävä)	Kelpuutettava yhteys, datanopeus rajoitettu.
+4... +0 dB	4 (riittävä)	Kelpuutettava yhteys, yhteysongelmat mahdollisia.
-1... -5 dB	5 (huono)	Huono, paljon häiriötä, tiedonsiirto heikkoa ja yhteys epävaka.
-6... -10 dB	6 (riittämätön)	Erittäin huono, tiedonsiirto mahdotonta

Taulukko 6. RSSI:n arviointi (Metageek s.a)

RSSI	Arvosana	Kommentti
-30 dBm	1 (erittäin hyvä)	Parhain saavutettava signaalivoimakkuus.
-67 dBm	2 (hyvä)	Minimi signaalivoimakkuus sovelluksille jotka vaativat nopeaa ja luotettavaa tiedonsiirtoa.
-70 dBm	3 (tyytyttävä)	Minimi signaalivoimakkuus luotettavalle tiedonsiirrolle.
-80 dBm	4 (huono)	Minimi signaalivoimakkuus perus yhteyksille. Pakettien toimitus voi häiriintyä.
-90 dBm	5 (käyttökelvoton)	Tiedonsiirto lähes mahdotonta.

3.8 Kaistanleveys ja Carrier Aggregation

Radioverkkojen taajuuksien periaate on itsessään yksinkertainen: mitä korkeampi taajuusalue, sitä korkeampi datakapasiteetti. Samalla korkea taajuusalue on huomattavasti alttiimpi signaalin hajaantumiselle eli propagaatiolle. Matalampi taajuus kuten 800 MHz:n taajuusalue pystyy kulkemaan pidempiä matkoja, mutta omaa pienemmän datakapasiteetin.

Taajuuskaistanleveys vaikuttaa samalla tavalla kuin käytettävä taajuusalue: mitä suurempi kaistanleveys, sitä enemmän on "tilaa" lähettää dataa käytettävällä kaistanleveydellä. Kaistanleveydellä ja alikantoaaltojen leveydellä on myös suora vaikutus tiedonsiirron vasteaikaan. Taulukossa 7 näemme suurempien kaistanleveyksien vaikutuksen lähetettävien alikantoaaltojen määrään.

Taulukko 7. Kaistanleveyden vaikutus alikantoaaltojen määrään (Perez 2015, 120)

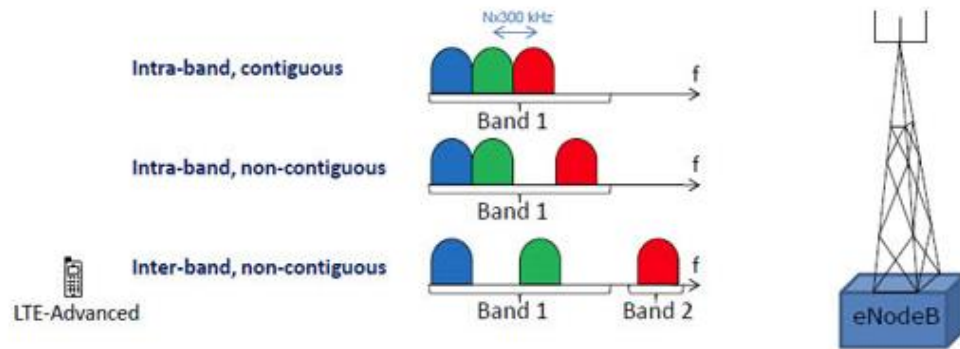
Käytettävän radiokanavan kaistanleveys	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Alikantoaaltojen määrä	72	180	300	600	900	1 200

Kantaaaltojen yhdistämistä (Carrier Aggregation, CA) käytetään modernissa LTE- ja LTE-A-verkossa, jossa jopa viisi eri yksittäistä kantaaltoa (Component Carrier, CC) yhdistetään eri radiokanavilta luoden maksimissaan 100 MHz:n (5 x 20 MHz) taajuuskaistanleveyden. Kantaaaltojen yhdistäminen onnistuu myös eri kaistanleveyksien välillä. Suomessa hyvin tyypillinen yhdistelmä olisi esimerkiksi B3 + B20 (1 800 MHz + 800 MHz), joissa 1 800 MHz:n taajuusalueelle on allokoitu 20 MHz:n kaistanleveys ja 800 MHz:n taajuusalueelle vain 10 MHz:n kaistanleveys. Tämä järjestely luo 20 + 10 MHz:n kantaaltojen yhdistyksen ja yhteensä 30 MHz:n kaistanleveyden. Kantaaaltojen yhdistämisen tekniikalla voidaan päästä LTE-A-verkossa jopa useamman sadan megabitin ja jopa gigabitin nopeuksiin.

Kantaaaltoja voidaan yhdistää useamman eri kaavan mukaan. Esimerkkinä kuvan 16 mukaisesti:

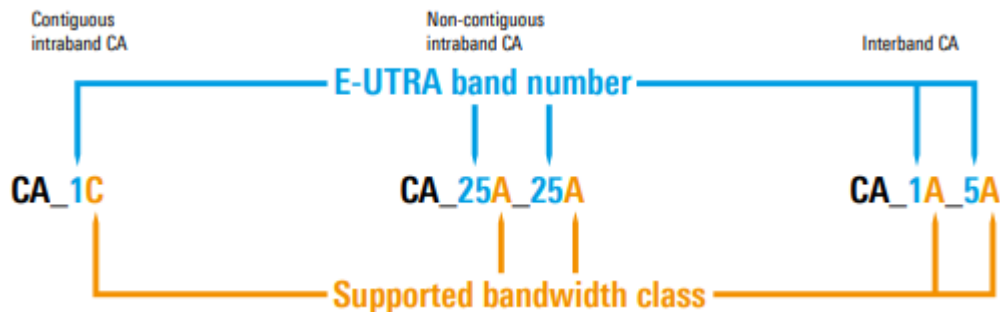
- Saman taajuuden (2 100 MHz) vierekkäiset kanavat voidaan yhdistää

- Saman taajuuden (2 100 MHz) kolme erillistä kanavaa voidaan yhdistää
- Tai kaksi eri taajuuskanavaa (2100 MHz + 1 900 MHz) voidaan yhdistää



Kuva 16. Kantoaaltojen yhdistäminen eri menetelmillä (Wannstrom 2019)

Kantoaaltojen yhdistämisessä voidaan käyttää sekä FDD- että TDD-tekniikkaa joko erikseen tai samaan aikaan.



Kuva 17. Päätelaitteen käyttämä terminologia kaistayhdistelmille (Rohde & Schwarz 2012b)

Kantoaaltojen yhdistämisessä on useampi eri luokka, jotka on jaettu niiden tukemien kaistanleveyksien mukaan. CA-kykenevä päätelaite kommunikoi verkolle mitä kaistayhdistelmiä se pystyy käyttämään, ja nämä kaistayhdistelmät ilmoitetaan taajuusaluekohtaisesti downlink- ja uplink-suunnille. Kuvassa 17 on esitelty kaikkien kolmen eri CA-kaavojen terminologia. Esimerkkinä kuvan 17 Interband-variaatio CA_1A_5A, missä päätelaite pystyy siirtämään liikennettä kahdella band 1- ja band 5 -taajuusalueiden kantoaalloilla kaistanleveysluokalla A. Jokainen luokka tukee eri maksimaalista kaistanleveyttä, mikä perustuu maksimaaliseen resurssilohkojen (Resource Block, RB) määrään.

A-luokan kaistanleveysluokka sisältää maksimissaan 100 resurssilohkoa, mikä vastaa 20 MHz:n kaistanleveyttä. Nämä luokat ovat vielä kuvattu taulukossa 8.

Taulukko 8. Päätelaitteen CA-kaistanleveysluokat (Rohde & Schwarz 2012b)

CA Kaistanleveys luokka	Kaistanleveys (RB)	Maksimaalinen kaistanleveys (MHz)	Maksimaalinen CC-kantoaaltojen määrä
A	$N \leq 100$	20	1
B	$25 < N \leq 100$	20	2
C	$100 < N \leq 200$	40	2
D	$200 < N \leq 300$	60	3
E	$300 < N \leq 400$	80	4
F	$400 < N \leq 500$	100	5
I	$500 < N \leq 600$	160	6

4 5G

5G NR -verkko (New Radio) tuo mukanaan monta uutta teknologiaa, joista suuri osa on vielä kehityksessä. Koko 5G-runkoverkko tulee uudistumaan vanhemmasta EPC-verkosta käyttämällä nykyisen E-UTRAN-verkon infrastruktuuria hyväkseen. Olemassa olevat valokuitulinkit ja valmiiksi asennetut 4G-verkolle tarkoitettut mastot tulevat olemaan osa 5G-verkon kokonaisuutta. 5G-verkon myötä on tulossa huomattavasti uudistuksia sekä radioverkon infrastruktuurissa että sen runkoverkon toiminnassa.

Millimetrispektrin (20–300 GHz) käyttäminen datasiirron taajuusalueina, pienet solut tiheästi rakennettuna verkkona, massiivinen MIMO-antennien (Multiple Input Multiple Output) käyttö, ja säteen kohdistus (Beamforming) tulevat olemaan oleellinen osa 5G-verkon toimintaa.

5G toteutetaan vaiheittain kahdessa osassa, NSA (Non-Standalone mode) ja SA (Standalone). NSA tulee toimimaan osittain LTE-verkon avulla. SA ratkaisussa 5G-verkko on jo täysin autonominen, eikä tarvitse vanhemman LTE-verkon infrastruktuuria toimiakseen. Tämä on tosin huomattavasti pitkäkestoisempi prosessi, sillä koko 5G runkoverkon toiminta tulee vielä rakentaa. SA 5G -verkko tulee toki myös tuottamaan kaikki sen lupaamat edistykset kuten 1 ms:n vasteaika ja 1 Gbps:n nopeudet, joilla mahdollistuu teknologioiden kuten itseksensä ajavien autojen ja tulevaisuuden IoT-sovellutuksien toteutus, mitä NSA ratkaisu ei välttämättä pysty vielä tuottamaan.

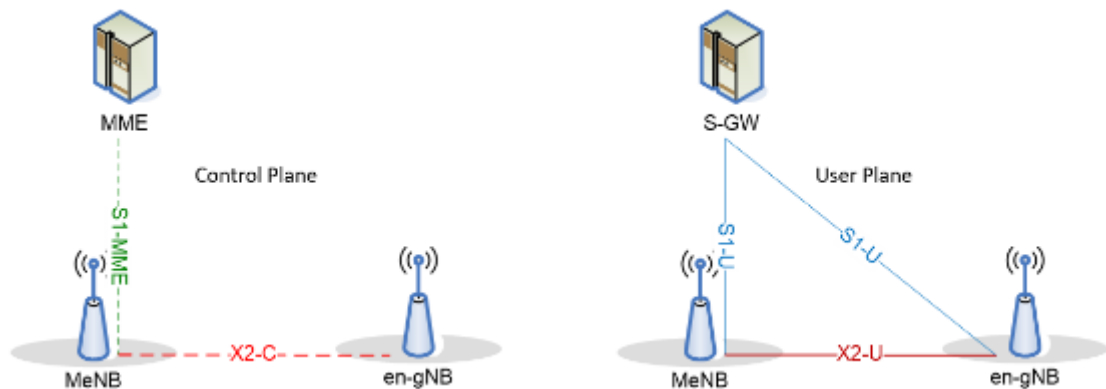


Kuva 18. Esimerkki 5G-verkon ja LTE-verkon yhdistämisestä (3GPP RWS-180007 2018, 13)

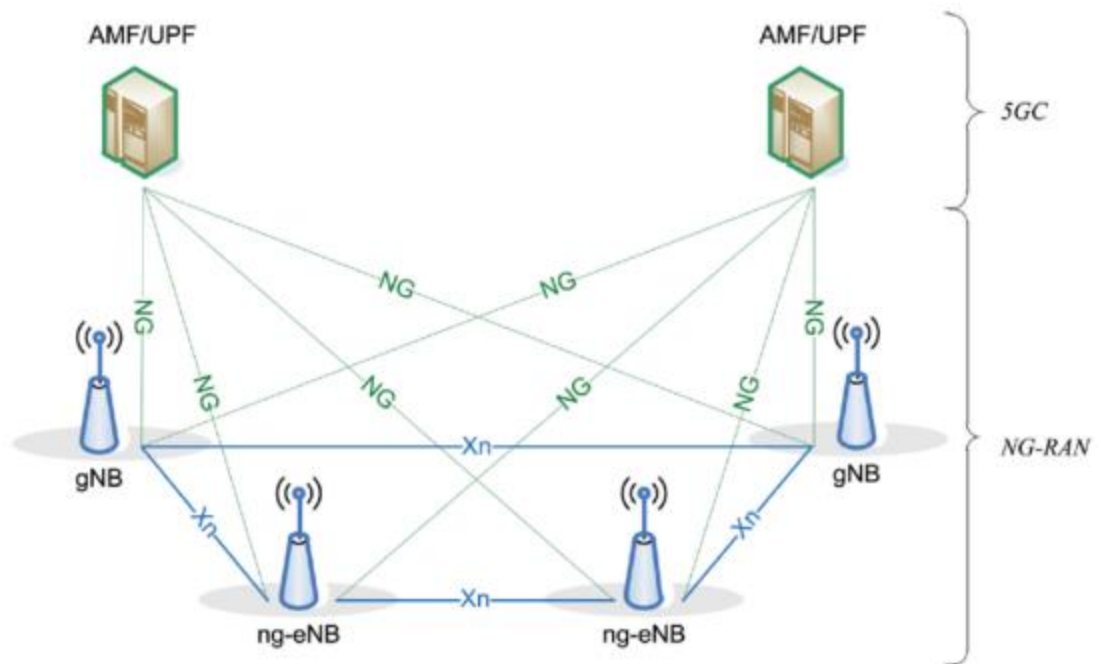
4.1 NG-RAN

NG-RAN (Next Generation Radio Access Network) koostuu uudenlaisista gNB-tukiasemista (Next generation NodeB) ja siihen kuuluvasta runkoverkosta 5GC:stä (5G Core network). 5G-verkon NSA-ratkaisussa käytetään myös uudistettuja E-UTRAN verkon ng-eNB-tukiasemia (enhanced 4G base station). ng-eNB-tukiasemat ovat päivitettyjä versioita LTE-verkon tukiasemista, jotka tulevat toimimaan täydentävänä osana uudempaa NG-RAN-verkkoa.

NG-RAN tullaan toteuttamaan useammalla eri NSA- ja SA-ratkaisuilla. NSA ratkaisussa 5- ja 4G-verkon gNB- ja ng-eNB-tukiasemat toimisivat tiiviisti yhdessä, missä toinen toimisi päätukiasemana (Master eNodeB, MeNB) ja toinen toissijaisena tukiasemana (Secondary eNodeB, en-gNB). Näin saavutetaan kustannustehokas siirtyminen 5G-verkkoon käyttäen molempien mobiili-verkkojen parhaita puolia hyväksi kunnes 5GC tulee täysin käyttöön. SA-ratkaisussa gNB-tukiasemat olisivat jo suoraan yhteydessä 5GC-runkoverkkoon, eikä E-UTRAN-verkon infrastruktuuria tarvittaisi enää 5G-verkon toiminnassa. Kuvat 19 ja 20 esittelevät NSA- ja SA-ratkaisujen arkkitehtuuria.



Kuva 19. NG-RAN-verkon NSA arkkitehtuuri (3GPP RWS-180009 2018, 10)

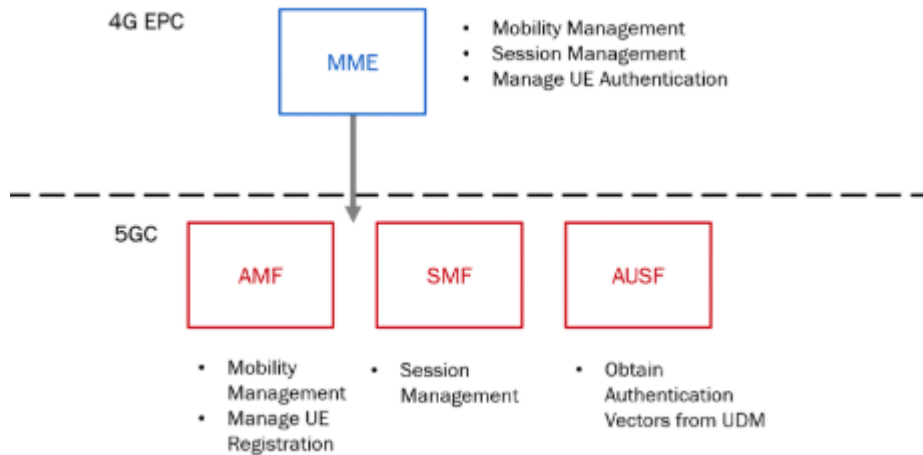


Kuva 20. NG-RAN-verkon SA arkkitehtuuri (3GPP RWS-180009 2018, 6)

4.2 5GC-verkko

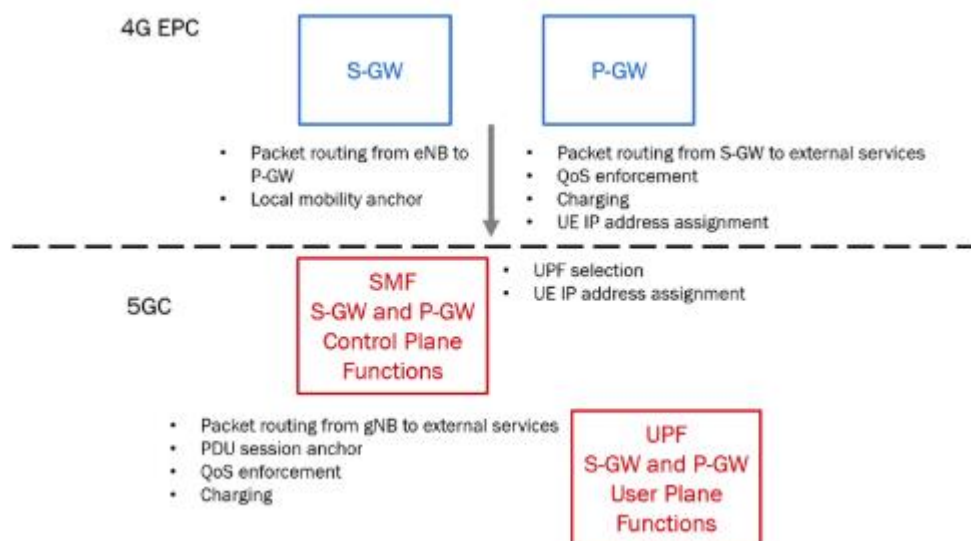
Kuvasta 20 näemme kuinka SA 5GC -verkko ei tule enää käyttämään samoja komponentteja kuin E-UTRAN-verkossa. Tukiasemat eivät yhdisty S-GW:hen tai MME:hen, vaan AMF:ään (Access and Mobility Management Function) ja UPF:ään (User Plane Function). Nämä uudet komponentit tulevat suorittamaan samat asiat kuin S-GW ja MME, ja enemmänkin.

5GC-verkossa MME:n tehtävät ovat käytännössä jaettu AMF:lle, AUSF:lle (Authentication Server Function) ja SMF:lle (Session Management Function). AMF hoitaa päätelaitteiden rekisteröinnin sekä liikkuvuuden hallinnan. Käyttäjien varmistus, rekisteröinnin tai uudelleenrekisteröinnin aikana tapahtuu AUSF:lla. 5GC-verkon SMF tarjoaa saman session hallinnankäytettävyyden kuin MME, ja samalla yhdistää osan S-GW:n ja P-GW:n ohjaustason toiminoista omaan toimintaansa. (Shepherd 2018.)



Kuva 21. MME:n muutos 5GC-verkkoon (Shepherd 2018)

UPF yhdistää käyttäjäliikenteen toiminnot, joita EPC-verkossa käsitteli S-GW ja P-GW. UPF ankkuroi päätelaitteen IP-osoitteet. Liikenne kulkee päätelaitteelta gNB-tukiasemaan, ja siitä UPF:ään. UPF tukee myös QoS-toimintoja (Quality of Service). (Shepherd 2018.)

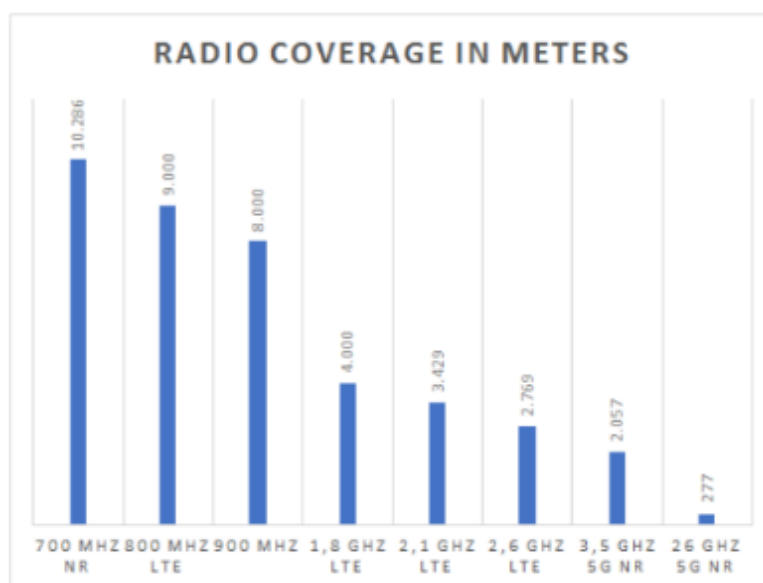


Kuva 22. S-GW:n ja P-GW:n muutos 5GC-verkkoon (Shepherd 2018)

5GC-verkossa käyttäjien tiedot, kuten sovelluskohtaiset tiedot ja toimintaperiaatteisiin liittyvät tiedot säilytetään UDR:ssä (Unified Data Repository). UDR on 5GC-verkon versio EPC-verkon HSS:stä. UDM (Unified Data Management) on välikappale, joka on suorassa vuorovaikutuksessa AMF:n ja AUSF:n kanssa, kuten EPC-verkon MME oli suorassa vuorovaikutuksessa HSS:n kanssa.

4.3 Massive MIMO ja spatiaalinen multipleksaus

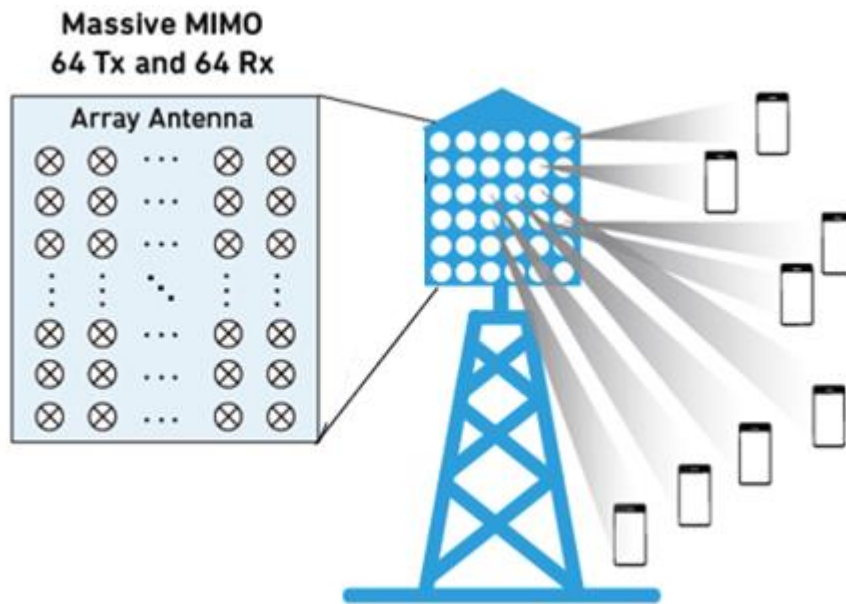
5G-verkon myötä tulee yhä korkeampia taajuuksialueita käyttöön, signaalin nopea heikkeneminen etäisyyden myötä tulee yhä oleellisemmaksi ongelmaksi. Mitä korkeampi taajuus, sitä nopeammin signaali menettää tehonsa. Kuva 23 havainnollistaa signaalin kantavuutta eri taajuuksialueilla.



Kuva 23. Eri taajuuksialueiden kantavuus metreissä (5GPP 2019, 53)

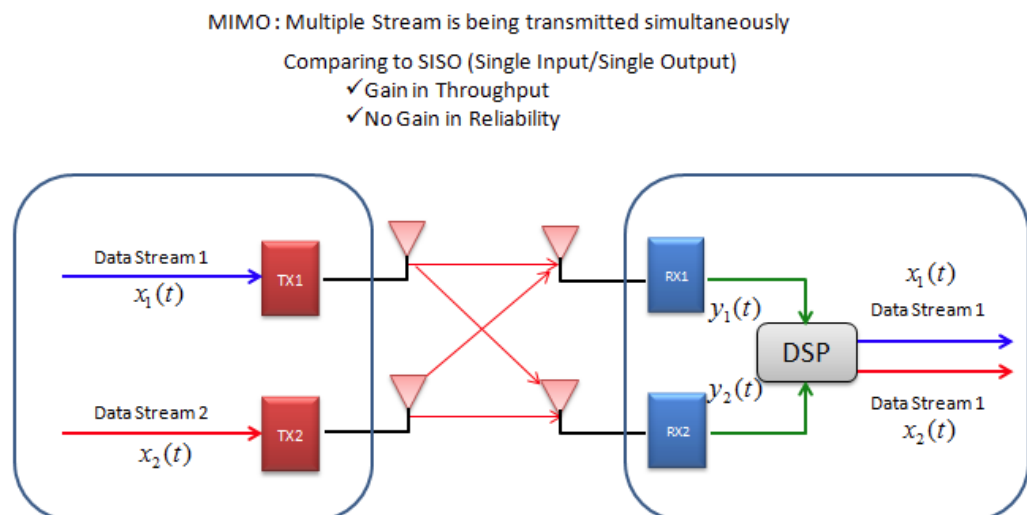
Signaalin heikkenemisen vähentämiseksi 5G-verkossa käytetään pieniä tukiasemia ja massiivista MIMO-antennien sijoittelua.

Nykyisessä 4G-verkossa tukiasemat sijaitsevat useimmiten korkeissa radio-mastoissa tai maamerkeissä mahdollisimman suuren kantavuuden saavuttamiseksi ja häiriöiden minimoimiseksi. Massiivinen MIMO perustuu samaan ideaan, mutta moninkertaisella antennien määrällä. Massiivisella MIMO-antennien sijoittelulla saavutetaan laaja signaalin kantavuus päätelaitteille. Samalla isommista tukiasemista saadaan vankka yhteydenottopiste pienemmille tukiasemille. Kuvassa 24 näemme 128:n antennin Massive MIMO -havainnollituksen, mastossa on 64 vastaanottavaa (Rx) ja 64 lähettävää (Tx) antennia.



Kuva 24. 128:n antennin Massive MIMO (Kapilavai 2019)

Käyttämällä useampia antennia tiedon lähetykseen ja vastaanottamiseen voidaan hyödyntää spatiaalista multipleksausta, missä tukiasemat lähettävät useita eri datavirtoja eri antennien kautta. 2x2 MIMO -antenni pystyy lähettämään kaksi kertaa enemmän dataa kerralla kuin laite, jossa on vain yksi antenni per suunta, eli SISO-antenni (Single Input Single Output). Kuva 25 havainnollistaa MIMO:n ja spatiaalisen multipleksauksen periaatetta.

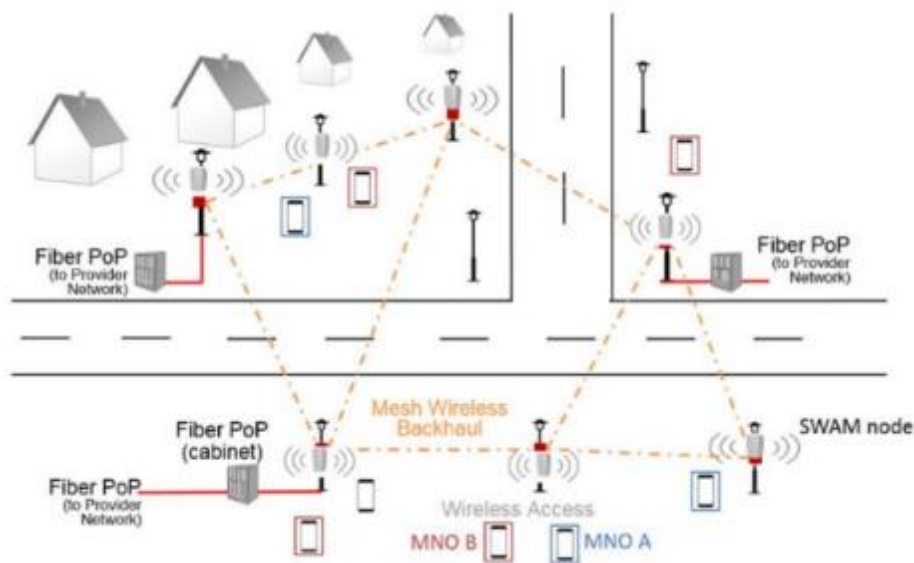


Kuva 25. MIMO ja spatiaalinen multipleksaus (Share Technote s.a)

4.4 Small Cell

Pienet tukiasemat ovat tekniikkaa jolla saadaan kasvatettua 5G-verkon peittoaluetta. Tiheästi asutetut kohteet kuten kaupungit sisältävät paljon esteitä

esimerkiksi korkeita rakennuksia jotka estävät 5G-verkon korkeampien taajuuksien tehokkaan liikkumisen. 5G-verkossa asennetaan tiheästi pienempiä ja energiatehokkaampia tukiasemia ympäri haluttua aluetta. Tukiasemien tiheällä sijoittelulla saavutetaan mahdollisimman kattava keskenään kommunikoiva verkko. gNB-tukiasemat pystyvät ohittamaan rakenteelliset esteet välittämällä tietoa keskenään ja etsimällä parhaita reittiä tiedonsiirrolle tukiasemien välillä. Kuva 26 havainnollistaa small cell arkkitehtuuria.

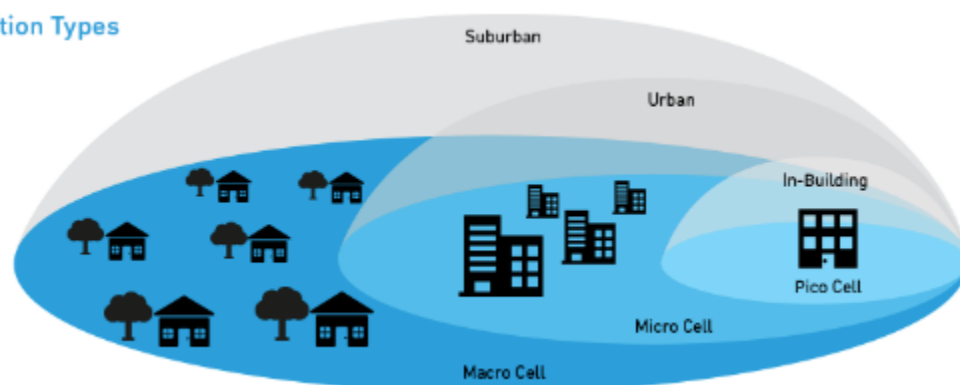


Kuva 26. Small cell arkkitehtuuri (5GPP 2019, 81)

NG-RAN-tukiasemat ovat jaettu omiin luokkiinsa tehokkuuden ja käyttötarkoituksen perusteella. Uudet tiheästi asennetut ja energiatehokkaat tukiasemat kaupungeissa voivat lähettää tietoa vain hyvin lyhyiden välimatkojen välillä, kun tehokkaammat harvaan asennetut tukiasemat pystyvät lähettämään tietoa hyvinkin pitkille välimatkoille soveltuen paremmin syrjäseuduille.

Femto-solut ovat tarkoitettu lyhyille välimatkoilla ja palvelevat vain muutamia kymmeniä päätelaitteita kerralla. Pico-solut ovat hieman tehokkaampia ja pystyvät palvelemaan jo useampia kymmeniä päätelaitteita. Mikro-solut ovat jo suurempia ja tehokkaampia, kykeneviä palvelemaan jo yli tuhatta päätelaitetta ja tarkoitukseltaan soveltuvat kaupungin ulkorajoille tai sen lähetyville. Makro-solut ovat tehokkaimpia soluja, jotka soveltuvat hyvin syrjäseuduille. Kuva 27 havainnollistaa solujen käyttösovellutusta ja taulukosta 9 näemme eri solujen tehokkuuden.

Base Station Types



Kuva 27. Solujen käyttötarkoitukset (Nguyen 2017)

Taulukko 9. Eri solujen tehokkuudet (Nguyen 2017)

Solutyyppi	Lähetysteho	Solun kantavuus	Käyttäjämäärä	Sijainti
Femto-solu	0.001 - 0.25W	0.010 - 0.1km	1 - 30kpl	Sisätila
Pico-solu	0.25 - 1W	0.1 - 0.2km	30 - 100kpl	Sisä/ulkotila
Mikro-solu	1 - 10W	0.2 - 2.0km	100 - 2000kpl	Sisä/ulkotila
Makro-solu	10 - 50W	8 - 30km	>2000kpl	Ulkotila

4.5 5G-taajuusalueet ja kaistanleveys

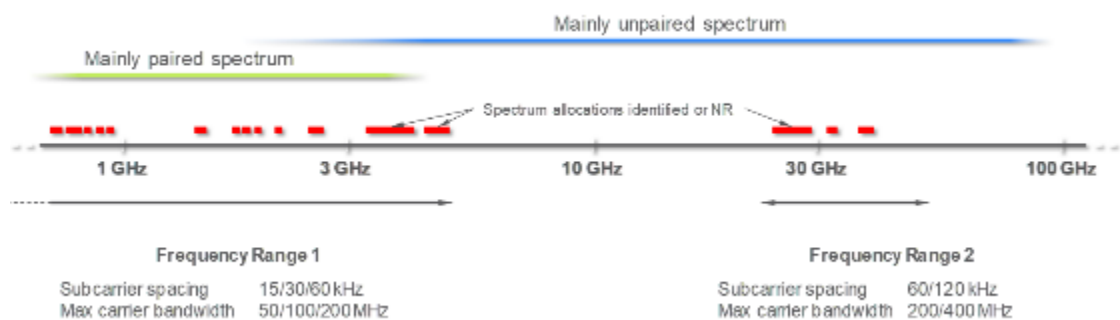
5G tulee toimimaan kahdella eri taajuusaluepektrillä, FR1 (Frequency Range) ja FR2. FR1 toimii alle 6 GHz:n taajuusalueella, jota operaattorit Suomessakin ovat jo alkaneet käyttämään. FR2 toimii millimetrispektrillä, joka sijoittuu 20–300 GHz:n taajuusalueella. Vuonna 2019 2 GHz:n, 2,6 GHz:n ja 3,5 GHz:n taajuuskaistoja on jo allokoitu 5G NR:n käyttöön, mutta millimetrispektriltä ei ole vielä virallisesti allokoitu taajuuskaistoja käytettäväksi. 3GPP-julkaisussa RWS180011 Euroopalle on ehdotettu uutta FR1 3.4–3.8 GHz:n taajuus- aluetta, sekä FR2 millimetrispektrillä 24.25–27.5 GHz:n taajuus- aluetta.



Kuva 28. 5G taajuusalueiden allokointisuunnitelma (3GPP RWS-180011 2018, 4)

Nykyiset LTE-verkon käyttämät taajuudet tulisi jatkamaan toimintaa FDD-tekniikalla, mutta uudet 5G NR -taajuudet tulevat toimimaan TDD-tekniikalla.

Kaistanleveys sekä alikantoaaltojen leveys tulee suurentumaan moninkertaisesti. Nykyinen 15 kHz:n alikantoaalto säilytetään, mutta sen lisäksi FR1 taajuusalueelle tulisi käyttöön myös 30 kHz:n ja 60 kHz:n alikantoaallot. Kaistanleveys FR1-taajuusalueella kasvaisi 50/100/200 MHz:n luokkaan, joka olisi kaksinkertainen parannus nykyiseen LTE-verkon 100 MHz:n kantaallojen yhdistämisellä saavutettuun kaistanleveyteen.

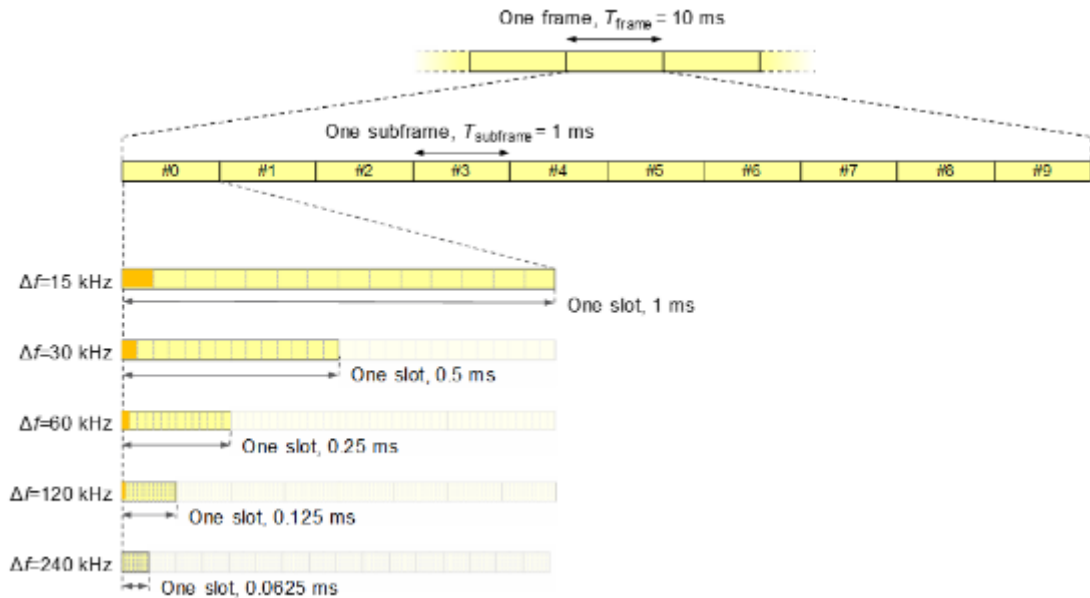


Kuva 29. 5G taajuusalueet ja kaistanleveydet (3GPP RWS-180007 2018, 4)

FR2 tulisi luonnollisesti käyttämään vielä suurempia kaistanleveyksiä ja alikantoaaltojen leveyttä kuin FR1. Alikantoaalto tulisi olemaan 60 kHz ja 120 kHz leveä, joka on jo kahdeksan kertaa suurempi kuin nykyisessä LTE-verkossa. 5G-verkossa kaistanleveys olisi 200/400 MHz leveä ja neljä kertaa suurempi kuin nykyisen LTE-verkon suurin mahdollinen taajuuskaistanleveys. Suurempien kaistanleveyksien myötä datakapasiteetti tiedonsiirrolle kasvaa huomattavasti saavuttaen mainostetut yli 1 Gbps:n nopeudet päätelaitteille. Alikantoaaltojen kaistanleveyden kasvattamisella saavutetaan nopeampi 1 ms:n vasteaika kuin nykyisellä LTE-verkon alikantoaallon 15 kHz:n kaistanleveydellä.

LTE-verkossa yksi radiokehys liikkuu 10 ms:n vasteajalla, ja kymmenen 1 ms:n vasteajalla toimivaa alikehystä muodostaa yhden radiokehysten. Yksi alikehys sisältää aiemmin mainittuja alikantoaaltoja, jotka ovat 15 kHz leveitä. Kun alikantoaallon kaistanleveys tuplataan esimerkiksi 30 kHz leveäksi, sen toimitukseen kuluva vasteaika puolittuu 0,5 millisekuntiin. Alikantoaallon kaistanleveyden tuplaaminen puolittaa alikehysten toimitukseen kuluvan ajan.

Käyttämällä suurempia alikantoaaltojen kaistanleveyksiä saavutetaan 1 ms:n vasteaika 5G-verkossa. Kuva 30 havainnollistaa alikantoaallon kaistanleveyden vaikutusta vasteaikaan.



Kuva 30. 5G radiokehysten periaate (3GPP RWS-180007 2018, 6)

4.6 5G Carrier Aggregation

5G tulee soveltamaan kantoaaltojen yhdistämistä samalla tavalla kuin LTE-verkossa, mutta pystyy myös soveltamaan kantoaaltojen käyttöä tapauskohtaisesti. Kantoaaltojen yhdistäminen voi tapahtua molempiin suuntiin, sekä lähetykseen että vastaanottamiseen. Mikäli päätelaite tarvitsee enemmän kaistanleveyttä lähettämiseen, voidaan kantoaaltojen yhdistämistä käyttää pelkästään lähetyssuunnassakin. Näin saavutetaan tarpeelliset kaistanleveydet ilman mobiiliverkon tarpeetonta ruuhkauttamista.

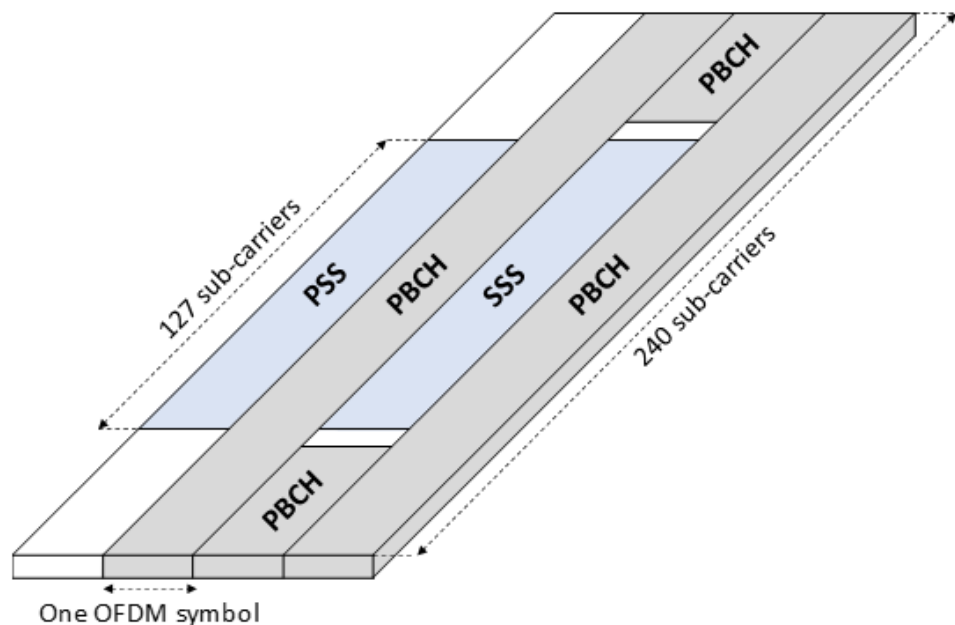


Kuva 31. Kantoaaltojen yhdistäminen symmetrisesti ja asymmetrisesti (3GPP RWS-180007 2018, 12)

4.7 Beamforming

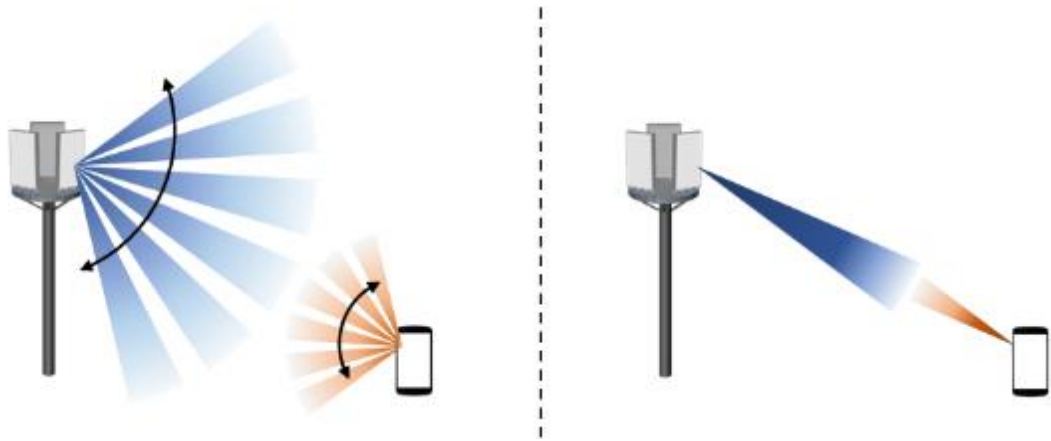
Nykyisessä LTE-verkossa käytetään kiinteää analogista sädettä per tukiasema. Näin tuotetaan jatkuva kattavuus signaalille ajankohdasta riippumatta. 5G-verkon beamforming-tekniikalla pystytään dynaamisesti kohdistamaan tukiaseman lähettämät radioaallot haluttua päätelaitetta kohti. 5G tulee käyttämään useampia ohjattavia analogisia säteitä, joilla saadaan vähennettyä mobiiliverkon ruuhkautumista ja häiriöitä.

Päätelaite mittaa parhaimman tukiasemasta saatavan signaalin käyttämällä synkronisaatio-signaali-blokkeja (Synchronization Signal Block, SSB). SSB koostuu ensisijaisesta synkronisointi signaalista (Primary Synchronization Signal, PSS), toissijaisesta synkronisointi signaalista (Secondary Synchronization Signal, SSS) ja PBCH:sta (Physical Broadcast Channel). PSS- ja SSS-tekniikoita käytetään vastaanotettavan liikenteen synkronisointiin. PBCH:ta käytetään datan kuljettamiseen. Kuvassa 32 näemme SSB:n periaatteen.



Kuva 32. SSB:n rakenne (3GPP RWS-180007 2018, 36)

Päätelaite mittaa kaikki tukiaseman kohdistavien signaalien voimakkuudet käyttämällä synkronisaatio-signaali-blokkeja, jonka jälkeen päätelaite valitsee parhaimman SSB:n ja yhdistyy siihen. Kuva 33 havainnollistaa tätä ilmiötä.



Kuva 33. Beamformingin periaate (3GPP RWS-180008 2018, 14)

5 KAAPELITEKNIIKAT

5.1 Signaalihäiriöt

Eri kaapelitekniikoilla voi olla suuriakin vaikutuksia tiedonsiirron suorituskyvyssä, oli tietoverkko toteutettu Ethernet-tekniikan, koaksiaalikaapeloinnilla, datasähkön tai kaikkien näiden tekniikoiden sekoituksen kautta.

Kuten mobiiliverkoissa, kiinteät yhteydet kärsivät monenlaisista signaalihäiriöistä kuten signaalin heikkeneminen, ylikuuluminen, vaimennus ja kohina. Korkeammalla taajuudella toimivat kaapelit ovat alttiimpia häiriölle kuin alhaisemmalla taajuudella toimivat. Pidemmät välimatkat aiheuttavat signaalin ja jännitteen heikkenemistä mikä voi vaikuttaa signaalin tulkittavuuteen.

Joka 3 dB:n vaimennus tarkoittaa 50 prosentin vähennystä signaalin voimakkuudessa. Esimerkiksi, 90m:n kaapeli, joka toimii 100 MHz:n taajuudella, johon syötetään 5 W tehoa ja omaa 20 dB:n vaimennuksen, aiheuttaa 100-kertaisen vähennyksen tehossa jolloin vastaanotin vastaanottaa vain 0,05 W:n tehon. Joka 6 dB:n vaimennus tarkoittaa 50 prosentin vähennystä jännitteen voimakkuudessa. (Oliviero & Woodward 2014, 38.) Taulukko 10 havainnollistaa logaritmista vaikutusta signaalin tehossa.

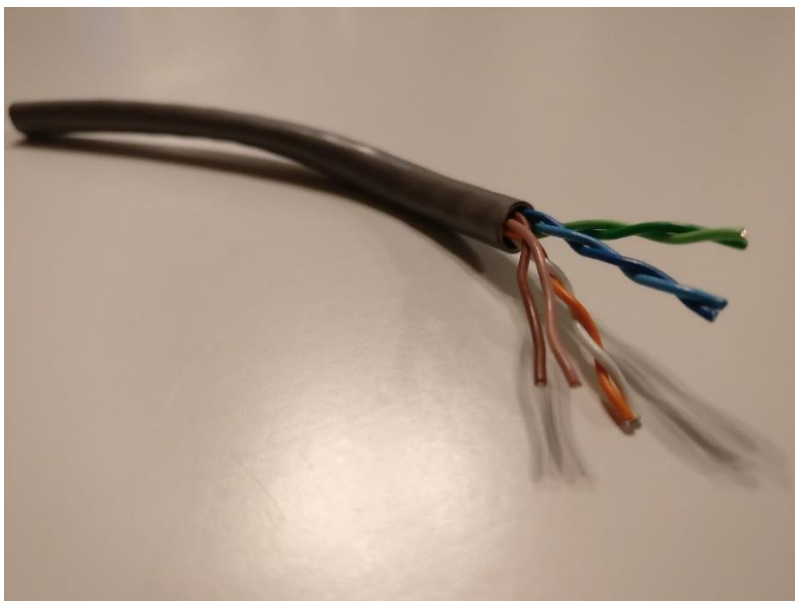
Taulukko 10. Logaritminen vaikutus tehoon (Oliviero & Woodward 2014, 40)

Decibel value	Actual increase in measured parameter
3 dB	2
10 dB	10
20 dB	100
30 dB	1 000
40 dB	10 000
50 dB	100 000
60 dB	1 000 000

Jokainen erillinen kytkentä vaikuttaa vaimennuksen määrään, kuten kaapelien väliset liitännät tai sen terminointi päätelaitteelle. Myös kaapelin laatu vaikuttaa vaimennukseen, mikäli matkan varrella on useampia liitäntöjä tai kaapeli on esimerkiksi vanhaa. Tämä voi aiheuttaa pidempie vasteaikoja ja hitaampia siirtonopeuksia.

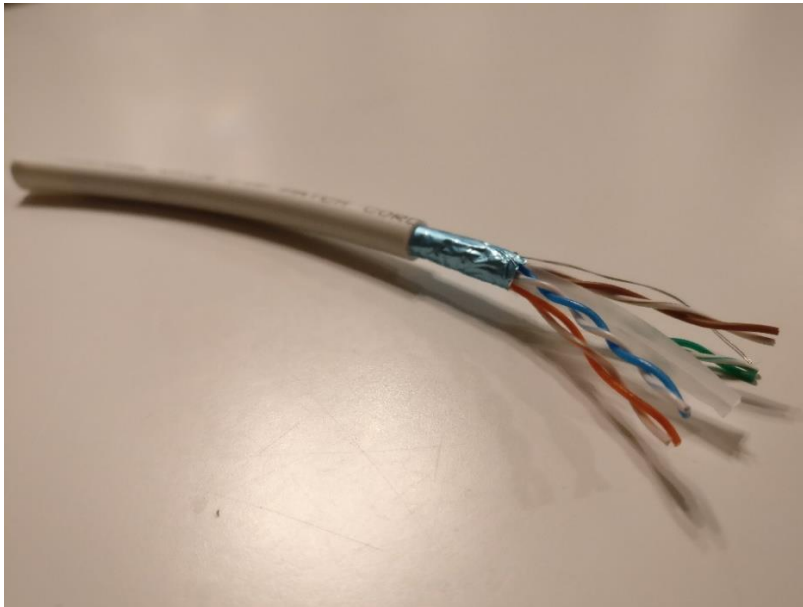
5.2 Ethernet

Ethernet-kaapeleita on monenlaisia, mutta käymme vain tälle työlle oleelliset kaapelitekniikat läpi. On kahta eri tyyppiä, UTP (Unshielded Twisted Pair) ja STP (Shielded Twisted Pair). UTP-kaapelissa kaapelin kuparijohtimet ovat kierrettyinä pareihin keskenään ulkoisen vaipan sisällä, Cat5e-standardin kaapeli on valmistettu näin. STP-kaapelissa vaipan sisällä olevat kuparijohtimet ovat myös kierretty keskenään, mutta ovat vielä erikseen foliosuojattu eri tasoilla ulkoisen elektromagneettisen häiriön minimoimiseksi. Kuva 34 havainnollistaa vielä Cat5e/UTP -Ethernet-kaapelin läpileikkausta.



Kuva 34. Cat5e/UTP -Ethernet-kaapeli

Cat6-standardinmukaiset Ethernet-kaapelit ovat hyvin samankaltaisia kuin Cat5e, mutta tuovat yhden parannuksen toimintaan. Kaapelin ulkoisen vaipan sisälle on laitettu "jakaja", millä jaetaan yksittäiset kupariparit erilleen toisistaan ylikuulumisen minimoimiseksi. Ylikuuluminen normaalisti tapahtuisi kuparijohtimien välissä, missä johtimien elektromagneettinen kenttä aiheuttaa häiriötä viereisiin johtimiin. Cat5e:n myötä ruvettiin käyttämään kierrettyjä johdinpareja ylikuulumisen vähentämiseksi, ja Cat6:n esittelemä jakaja vähensi ylikuuluvuutta ennestään. Tämän parannuksen myötä Cat6-kaapeleilla voidaan saavuttaa 1 Gbps:n nopeudet jopa 100 m:n matkalla.



Kuva 35. Cat6/STP -Ethernet-kaapeli

Kuten kuvassa 35 näemme, suojatun kaapelin kuparijohtimien päälle lisätään erillinen foliosuojaus. Cat6-kaapelissa kuparijohtimien välissä on vielä aiemmin mainittu johdinparien jakaja. Kun erilaisia suojauksia lisätään uudempiin kaapelitekniikkoihin, huomaamme että kaapeli yleensä tulee myös paksumaksi ja kalliimmaksi valmistaa. Tämä saattaa olla ongelma tietyissä tilanteissa, minkä takia tarve eri kaapelitekniikoille on hyvä kartoittaa ennen tietoverkon rakennusta.

5.3 Koaksiaali

Koaksiaalikaapeli oli ennen yleisin tiedonsiirtoon käytetty kaapelitekniikka maailmassa. Nykyaikana (2019) koaksiaali on vielä hyvin laajasti käytössä eri

talouksissa esimerkiksi kaapelitelevisiossa käytettävien johtojen muodossa, mikä antaa hyvät valmiudet tiedonsiirtoon ympäri rakennusta mikäli Ethernet-kaapelia tai muita tiedonsiirtotekniikkoja ei ole asennettu talouteen. Koaksiaalikaapelilla on puhdas ja paksu yksittäinen kuparijohdin keskustassaan jonka ympärillä on heikosti johtava eriste, kuten PVC- tai teflon-eriste. Eristeen ympärillä on vielä erillinen kuparinen tai alumiininen verkko joka suojaa elektronisilta häiriöiltä, jonka ympärillä on vielä muovinen vaippa. Nämä yhdistettynä paksun kuparijohtimen kanssa mahdollistaa huomattavasti suuremman kaistanleveyden ja vähemmän häiriöalttiin yhteyden kuin UTP - Ethernet-kaapeli. Nykyään koaksiaalikaapeli on huomattavasti kalliimpaa valmistaa kuin UTP -Ethernet-kaapeli, ja suhteessa Ethernet-kaapeliin vaikeaa ja epäkäytännöllistä käyttää. Kuva 36 havainnollistaa vielä koaksiaalikaapelin rakennetta.



Kuva 36. Koaksiaalikaapeli

Tarkoitus eri kaapelitekniikoille tässä opinnäytetyössä on point-to-point-yhteydet eri päätelaitteiden välillä, sillä varsinainen yhteys internetiin tapahtuu mobiiliverkon kautta. Tämä merkitsee sitä että koaksiaalikaapeliyhteydet eivät toimi itsenään, vaan vaativat aktiivilaitteen signaalin modulaatiota varten.

5.4 Datasähkö

Datasähkö eli PLC (Powerline Communications) on hieman erilaisempi tiedonsiirtotekniikka verrattuna aikaisempiin tyyppisiin kaapeleihin. PLC-

verkossa käytetään yleistä sähköverkkoa tiedonsiirtoon, joten tiedonsiirto ei tapahdu suljetussa verkossa kuten aikaisemmissa tekniikoissa. Kuten koaksiaalikaapelilla, datasähköä ei voi käyttää itsenään niin kuin ethernet-tekniikkaa voidaan, vaan vaatii aktiivilaitteen signaalin moduloimista varten.

PLC toimii aktiivisessa sähköverkossa käyttämällä eri taajuuksia tiedonsiirtoon kuin sähköverkko. Sähkö kulkee 50–60 Hz:n taajuudella normaalissa sähköverkossa, kun taas PLC käyttää huomattavasti korkeampaa 2–86 MHz:n taajuutta.

Datasähkö käyttää OFDM-modulaatiotekniikkaa suuremman datakapasiteetin saavuttamiseksi verkossa sekä hajoitettun spektrin modulaatiota (Spread spectrum). Spread spectrum on modulaatiotekniikka joka lähettää dataa koko vapaalla olevalla taajuusalueella (Hrasnica, Haidine & Lehnert 2004, 89). Tekniikat ovat hyvin saman tyyppisiä kuin mobiiliverkossa, sillä datan lähettämiseen liittyvät ongelmat ovat myös hyvin samankaltaisia, kuten ruuhkainen taajuusalue ja sen aiheuttamat häiriöt signaalin laadussa.

6 IPERF3-TYÖKALU TIEDONSIIRRON ANALYSOINTIIN

6.1 iPerf3-ohjelma

iPerf3 on iperf.fr-sivuston tarjoama ilmainen ohjelma tietoverkkojen suorituskyvyn mittaamiseen. iPerf-työkalu on laajasti käytetty ohjelma maksimaalisen siirtonopeuden selvittämiseksi IP-verkoissa.

Ohjelma perustuu kahden eri päätelaitteen väliseen linkkiin, jonka maksimaalista suorituskykyä mitataan. Ohjelma tukee useampia hienosäätöjä ja erilaisia parametreja liittyen ajoitukseen, puskureihin ja protokolliin kuten TCP (Transmission Control Protocol), UDP (User Datagram Protocol) sekä IPV4:llä (Internet Protocol Version 4) että IPV6:lla. Jokainen testitulokset ilmoittaa vakiona maksimisiirtonopeuden, lähetetyn datan määrän ja itse määritetyt parametrit.

6.2 iPerf3-ohjelman ominaisuudet

Ohjelma avataan käyttämällä joko käyttöjärjestelmän komentokehotetta tai microsoft powershelliä. Kahden eri päätelaitteen, kuten tietokoneiden, IP-osoitteet asetetaan palvelimeksi ja siihen yhteydessä olevaksi päätelaitteeksi, missä toinen tietokone toimii vastaanottavana palvelimena joka vastaanottaa toisen päätelaitteen yhdistämisspyynnön, ja toinen kone yhdistyy kyseiseen palvelimeen. Kuva 37 havainnollistaa iPerf:in toimintaa.

```
node2> iperf -s
-----
Server listening on TCP port 5001
TCP window size: 60.0 KByte (default)
-----
[ 4] local <IP Addr node2> port 5001 connected with <IP Addr node1> port 2357
[ ID] Interval      Transfer    Bandwidth
[ 4] 0.0-10.1 sec   6.5 MBytes  5.2 Mbits/sec

node1> iperf -c node2
-----
Client connecting to node1, TCP port 5001
TCP window size: 59.9 KByte (default)
-----
[ 3] local <IP Addr node1> port 2357 connected with <IP Addr node2> port 5001
[ ID] Interval      Transfer    Bandwidth
[ 3] 0.0-10.0 sec   6.5 MBytes  5.2 Mbits/sec
```

Kuva 37. iPerf-ohjelman periaate (iperf.fr s.a)

Kuvasta 37 näemme kuinka komennolla “-s” asetetaan päätelaite vastaanottavaksi palvelimeksi, kun taas komennolla “-c” asetetaan toinen päätelaite muodostamaan yhteys palvelimeen sen IP-osoitteen perusteella. Tämän jälkeen laitteet kommunikoivat keskenään ja mittaavat välillä olevan tiedonsiirtotekniikan maksimaalisen siirtonopeuden. Kuvassa 38 näemme esimerkki tuloksen iPerf3-mittauksesta Ethernet-tekniikalla.

```
PS C:\Users\PanuV\Downloads\iperf-3.1.3-win64\iperf-3.1.3-win64> ./iperf3.exe -c 192.168.1.101
Connecting to host 192.168.1.101, port 5201
[ 4] local 192.168.1.100 port 50019 connected to 192.168.1.101 port 5201
[ ID] Interval      Transfer    Bandwidth
[ 4] 0.00-1.00 sec   109 MBytes  916 Mbits/sec
[ 4] 1.00-2.00 sec   111 MBytes  933 Mbits/sec
[ 4] 2.00-3.00 sec   111 MBytes  933 Mbits/sec
[ 4] 3.00-4.00 sec   112 MBytes  940 Mbits/sec
[ 4] 4.00-5.00 sec   112 MBytes  939 Mbits/sec
[ 4] 5.00-6.00 sec   112 MBytes  934 Mbits/sec
[ 4] 6.00-7.00 sec   112 MBytes  940 Mbits/sec
[ 4] 7.00-8.00 sec   108 MBytes  902 Mbits/sec
[ 4] 8.00-9.00 sec   111 MBytes  933 Mbits/sec
[ 4] 9.00-10.00 sec  112 MBytes  936 Mbits/sec
-----
[ ID] Interval      Transfer    Bandwidth
[ 4] 0.00-10.00 sec  1.08 GBytes  930 Mbits/sec
[ 4] 0.00-10.00 sec  1.08 GBytes  930 Mbits/sec
sender
receiver
```

Kuva 38. iPerf3-ohjelman esimerkki tulos, Ethernet-kaapeli

7 LAITTEIDEN TESTAUS JA VERTAILU 800 MHZ:N, 1 800 MHZ:N JA 2 100 MHZ:N TAAJUUSALUEILLA

7.1 Testattavat laitteet

Testattavaksi laitteiksi internet-yhteydelle valittiin kaksi eri modeemia, ZyXEL LTE7460-M608 ulkokäyttöön ja Telian myymä Sagemcom Fast 5370 Air hybrid -modeemi sisäkäyttöön. Molemmat edustavat eri käyttöratkaisuja toisiinsa nähden mitä 4G-yhteyksissä käytetään ja molemmat ovat hyvinkin eri hintaluokassa kustannuksiltaan.

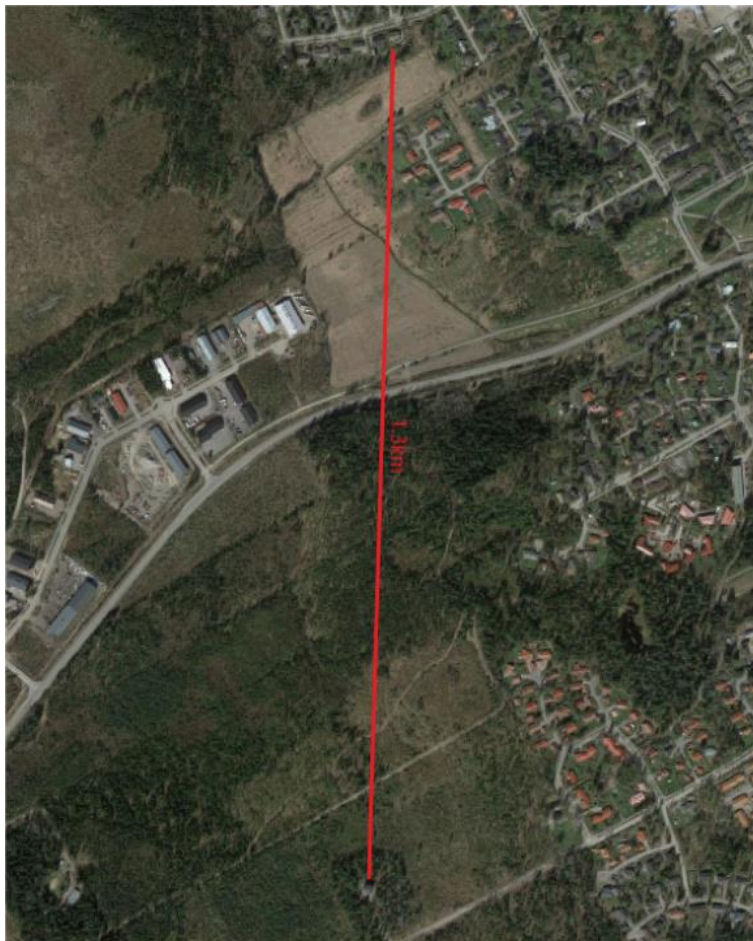
Sagemcom Fast 5370 Air on sisätiloihin tarkoitettu hybridimodeemi. Tässä tarkoituksessa käytämme modeemia pelkästään mobiiliverkossa eikä hybridiominaisuutta käytetä. Modeemi ja sen mukana tuleva mobiililaajakaistaliitymä on suhteellisen halpa noin 30 eurolla, mutta laitteen antennien tehokkuus on suhteellisen heikko, jonka takia laitteen käyttöalue on melko rajallinen.

ZyXEL LTE7460-M608 on taas tarkoitettu ulkokäyttöön ja omaa huomattavasti tehokkaamman suuntaavan paneeliantennin. Modeemi on kyllä huomattavasti kalliimpi kuin Sagemcom Fast 5370 Air, mutta omaa huomattavasti laajemman käyttöalueen ja suuremman mahdollisen siirtonopeuden. Laitetta voidaan käyttää siltaavassa tilassa, jossa modeemi toimii pelkkänä antennina jatkamalla saamansa julkisen IP-osoitteen seuraavalle laitteelle. Tämä mahdollistaa haluttaessa erillisen reitittimen käytön. Modeemi saa virtansa Ethernet-kaapelin kautta käyttämällä PoE-injektoria (Power over Ethernet), jonka takia modeemissa voidaan käyttää vain suojaamatonta Ethernet-kaapelia oikosulkujen välttämiseksi. Molemmat modeemit jakavat yhteyden sisäverkkoon Ethernet-tekniikan kautta.

7.2 Testauspaikka, asennus ja olosuhteet

Testauspaikkana toimii omakotitalo Tuusulan Jokelassa osoitteessa Kolsantie 24. Testauspaikka rajoittui talon omalle tontille keskittyen tontin etelä-lounasakselille noin 1,3 km:n päähän lähimmästä DNA:n LTE-tukiasemasta. Näkymä tukiasemasta talolle on suhteellisen selkeä, sillä tukiasema on kiinnitettynä vesitorniin, joka sijaitsee kukkulan huipulla. Signaali kulkee selkeästi kohti taloa

eikä matkan varrella ole suuria signaalia häiritseviä tekijöitä kuten korkeaa maastoa tai rakennuksia. Kuvassa 40 näemme vielä signaalin kulkeman reitin linnuntietä pitkin.



Kuva 39. Tukiaseman ja testipaikan välinen matka (Google Maps 2019)

ZyXEL LTE7460 -modeemi asennettiin kuvan 41 mukaisesti talon katolle lounaispäättyyn kiinnitettynä 90° kulmassa tv-mastoon ja suunnattuna etelään päin. Laitteen Cat6/UTP Ethernet -kaapeli vedettiin talon valmiita kaapeliputkia pitkin alakertaan tekniseen tilaan, mistä yhteys jatkui PoE-injektorin kautta Cat6/STP-kaapelia pitkin tarvittavaan päätelaitteeseen.

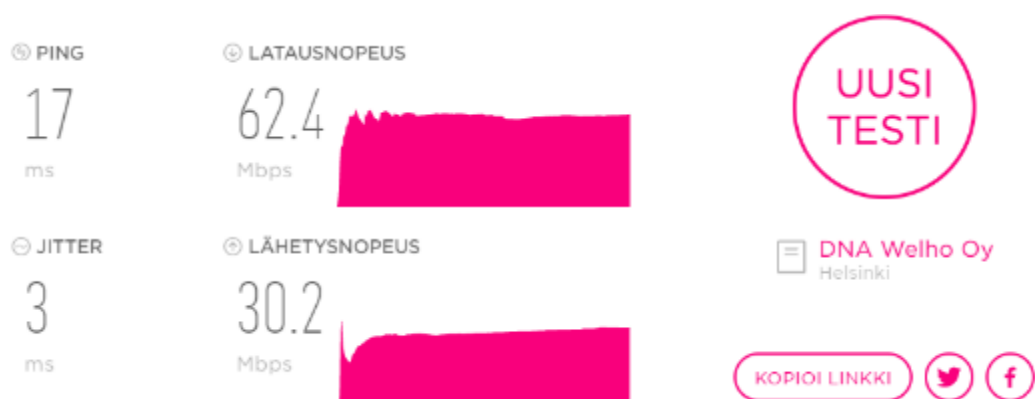


Kuva 40. ZyXEL LTE7460-M608 -modeemin asennus 2.11.2019

Olosuhteet 23.11.2019 lauantaina olivat suotuisat. Sää oli puolipilvinen, tyyni ja lämpötila oli -2° pakkasen puolella. Testaus suoritettiin klo 16.00–16.45 aikavälillä jotta realistinen tulos liikenteen määrän suhteen saavutettaisiin.

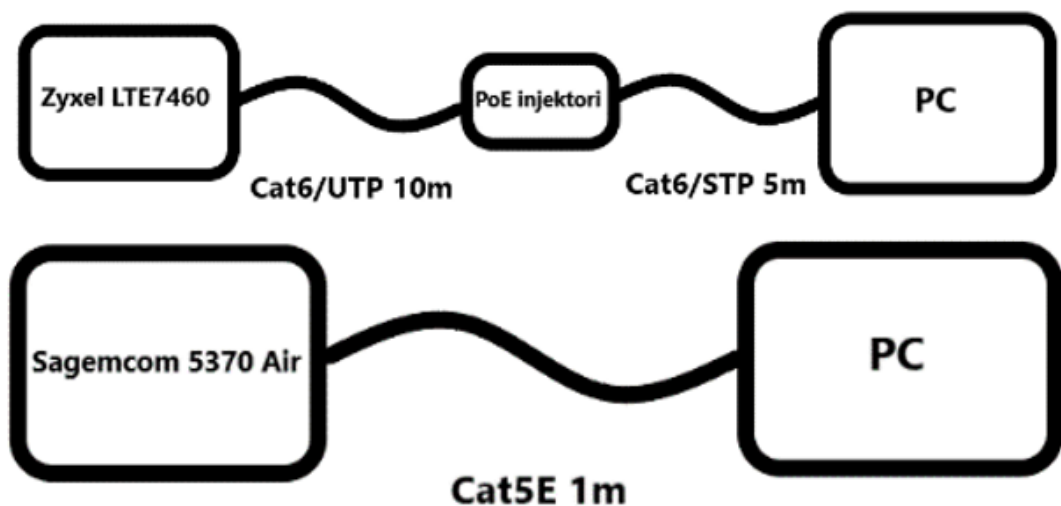
7.3 Laitteiden testausmenetelmä

Yhteys testattiin kahdella DNA:n 150 Mbps:n 4G-liittymällä jotta testit pystyttiin suorittamaan samanaikaisesti mahdollisten sääolosuhteiden muutoksien vaikutuksen minimoimiseksi. Lataus- ja lähetyksenopeudet, ping-viive ja jitter-viiveen vaihtelu mitattiin nopeus.dna.fi-sivuston nopeustestillä. Testit toistettiin viisi kertaa ja tulosten keskiarvo laskettiin taulukkoon jakamalla tulosten summa testien määrällä. Testeissä ei käytetty vakiopalvelinta vaan palvelimen annettiin vaihtua dynaamisesti parhaimman vasteajan mukaan.



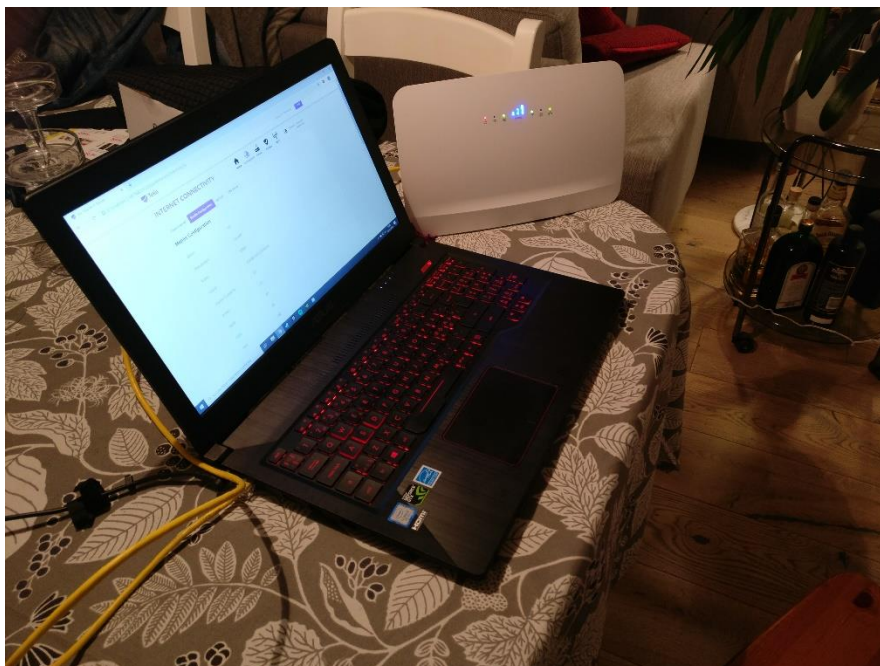
Kuva 41. DNA nopeustestin esimerkkitulokset, modeemi ZyXEL LTE 7460

Modeemien testauksien yhteydessä otettiin laitteen hallintasivuilta ylös sen hetkiset signaaliarvot kuten RSRP-, RSRQ-, SNR- ja RSSI-arvot. Kuvassa 42 on esitelty testauksessa käytetyt mittauskytkennät.



Kuva 42. Mittauskytkentä 23.11.2019

Testit pyrittiin suorittamaan mahdollisimman reiluissa olosuhteissa, jotta molemmat modeemit saisivat itselleen parhaimman mahdollisen yhteyden palvelevaan tukiasemaan. Kuvassa 43 näemme kuinka Sagemcom Fast 5370 Air sijoitettiin talon eteläkulmaan suunnattuna etelään kuten ZyXEL LTE7460.



Kuva 43. Sagemcom Fast 5370 Air testaus 23.11.2019

7.4 Mittaustulokset eri asetuksilla ja taajuusalueilla

Testaus aloitettiin käyttämällä molempien modeemien vakioasetuksia, joissa mitään asetuksia ei muutettu laitteen hallintasivuilta. Tämä päätettiin sisältää testeihin, jotta se toimisi vertailukohtana muille testeille, sillä se tulisi olemaan yleisin käyttöasetus mitä laitteilla käytettäisiin. Tämän jälkeen siirryttiin testaamaan systemaattisesti 800 MHz:n, 1 800 MHz:n ja 2 100 MHz:n taajuusalueet. Taajuusalueiden testauksessa modeemien asetuksista ei vaihdettu mitään muuta kuin käytettävä taajuus. Taulukossa 11 näemme mitausten kollektiiviset tulokset.

Taulukko 11. Mittaustulokset eri asetuksilla ja taajuuksilla 23.11.2019

	ZyXEL LTE7460				Sagemcom Fast 5370 Air			
	Vakio	800 MHz	1800 MHz	2100 MHz	Vakio	800 MHz	1800 MHz	2100 MHz
DL (Mbps)	10,42	19,58	11,1	37,72	25,82	12,12	20,32	29,78
UL (Mbps)	13,06	15,96	12,82	33,02	19,8	15,08	26,06	23,4
Ping (ms)	17	20	22	22	18	23,4	18,2	21
Jitter (ms)	2,8	3,2	7,4	2,4	5	9	5,6	2
RSRP (dBm)	-83	-71	-82	-83	-104	-86	-86	-105
RSRQ (dB)	-15	-9	-13	-8	-16	-13	-13	-13
SNR (dB)	5	9	9	15	10	7	7	10
RSSI (dBm)	-50	-46	-48	-57	-68	-59	-53	-67

Taulukosta 11 näemme kuinka vakioasetuksilla molemmat modeemit suoriutuivat heikosti tietyillä alueilla. ZyXEL LTE7460 saa huonoja latausnopeuksia vain 10 Mbps:n rajoilla ja heikon 5 dB:n signaalikohinasuhteen. Sagemcom Fast 5370 Air kärsii huomattavasta häiriön määrästä ollessaan sisätiloissa -104 dB:n vastaanotetulla signaalin teholla ja -68 dB:n vastaanotetussa signaalin voimakkuudessa. Molempien ongelmat todennäköisesti johtuivat ruuhkautuneesta 1 800 MHz:n taajuusalueesta, jota modeemit tuntuivat käyttävän lataus- ja lähetyksenopeuksien perusteella.

Tuloksien perusteella näemme, kuinka ulkoinen antenni tuo huomattavan eron nopeuksiin, mutta ei välttämättä niin merkittävää että se oikeuttaa sen tuomat lisäkustannukset verkon rakentamisessa. Testien yhteydessä huomattavaa on, kuinka ZyXEL LTE7460 käyttää vakioasetuksilla vain yhtä taajuusaluetta kerrallaan, vaikka Cat6-tason laitteena se tukeekin kahden kanta-aallon CA-tekniologiaa. Valitsin taajuudet 800 MHz ja 2 100 MHz käytettäväksi taajuusalueiksi pakottaen laitteen käyttämään kanta-aaltojen yhdistämistä ja saavuttaen huomattavasti parempia tuloksia. Kuvassa 44 näemme laitteen hallintasivulta, että kanta-aaltojen yhdistys on käytössä taajuuksilla E_UTRA_20 (800 MHz) ja E_UTRA1 (2 100 MHz).



The screenshot shows the 'Advanced Internet Information' page for a ZyXEL LTE7460 device. It displays various network parameters in a table format:

Advanced Internet Information			
Network Provider:			
DNA			
Network Type:	MCC:	MNC:	
LTE+	244	12	
Band:	FARFON 1:	Band1:	FARFON 2:
E_UTRA_20	6200	E_UTRA_1	300
LAC:	CID:	PCI:	RSRP:
6001	860693	309	83 dBm
RSRQ:	SNR:	RSSI:	
8 dB	21 dB	52 dBm	

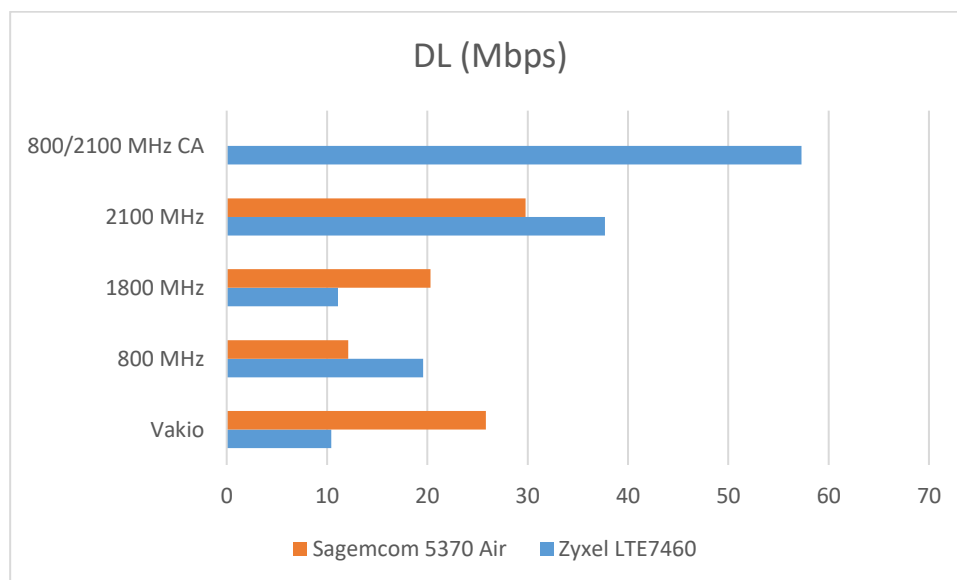
Kuva 44. ZyXEL LTE7460 Carrier Aggregation 23.11.2019

Taulukossa 12 on vielä ZyXEL LTE7460:n mittaustulokset CA-tekniologia käytössä.

Taulukko 12. ZyXEL LTE7460 Carrier Aggregation (23.11.2019)

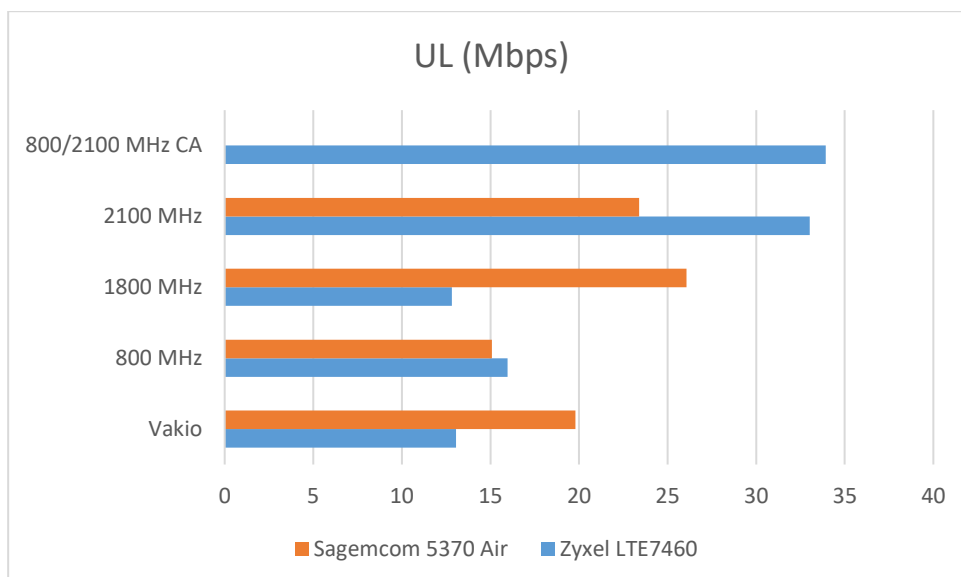
800/2100MHz CA	ZyXEL LTE7460
DL (Mbps)	57,28
UL (Mbps)	33,92
Ping (ms)	16,8
Jitter (ms)	1,8
RSRP (dB)	-80
RSRQ (dB)	-7
SNR (dB)	16
RSSI (dB)	-47

Taulukon 11 DL-sarakkeesta ja taulukon 12 DL-rivistä saadaan muodostettua kuva 46, missä näemme latausnopeuksien selkeät eroavaisuudet eri asetuksia ja taajuualueita käytettäessä. Huomattavaa on ZyXEL LTE7460:n tehottomuus vakioasetuksilla 1 800 MHz:n taajuualueella verrattuna Sagemcom Fast 5370 Airiin. Kun taas 800 MHz:n ja 2 100 MHz:n taajuualueet toimivat huomattavasti paremmin ZyXEL LTE7460:lla. CA-tekniikalla ZyXEL LTE7460 saavuttaa vielä lähes kaksinkertaisen nopeuden Sagemcom Fast 5370 Airiin nähden.



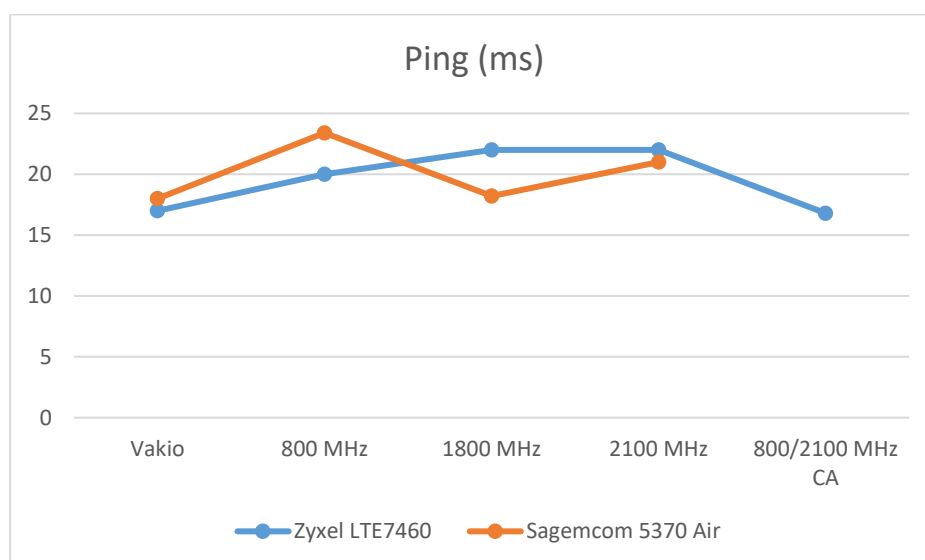
Kuva 45. Download-nopeus eri asetuksilla ja taajuualueilla 23.11.2019

UL-sarakkeesta ja rivistä voidaan muodostaa kuva 46. Kuvasta 46 voidaan nähdä saman tyyppisiä tuloksia kuin DL-suunnassa. Vaikkakin ZyXEL LTE7460 pääsee CA-tekniikalla parempiin tuloksiin kuin muut, yltää se silti vain 34 Mbps:n nopeuksiin.

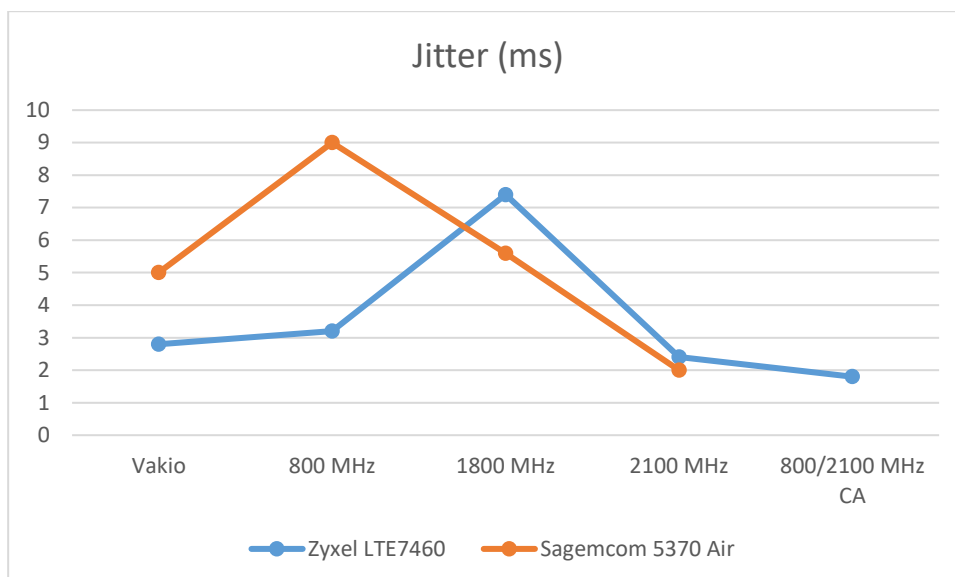


Kuva 46. Upload-nopeus eri asetuksilla ja taajuusalueilla 23.11.2019

Ping- ja Jitter-sarakkeesta ja rivistä voidaan muodostaa kuvat 47 ja 48. Kuvasta 48 näemme, kuinka kuinka ZyXEL LTE7460 kärsii suuremmasta vasteajasta korkeammilla taajuusalueilla, mutta CA-tekniikalla pienempi vasteaika saadaan saavutettua. Näemme myös, kuinka Sagemcom Fast 5370 Air osaa jälleen hyödyntää 1 800 MHz:n taajuutta paremmin vasteajan kanalta. Kuvasta 48 näemme, kuinka Sagemcom Fast 5370 Air kärsii kuitenkin viiveen vaihtelusta hieman enemmän testeissä kuin ZyXEL LTE7460, todennäköisesti johtuen sisätilojen esteiden aiheuttamasta häiriöstä. Huomattavaa on jälleen ruuhkautuneen 1 800 MHz:n taajuusalueen vaikutus vasteaikaan ja viiveen vaihteluun.

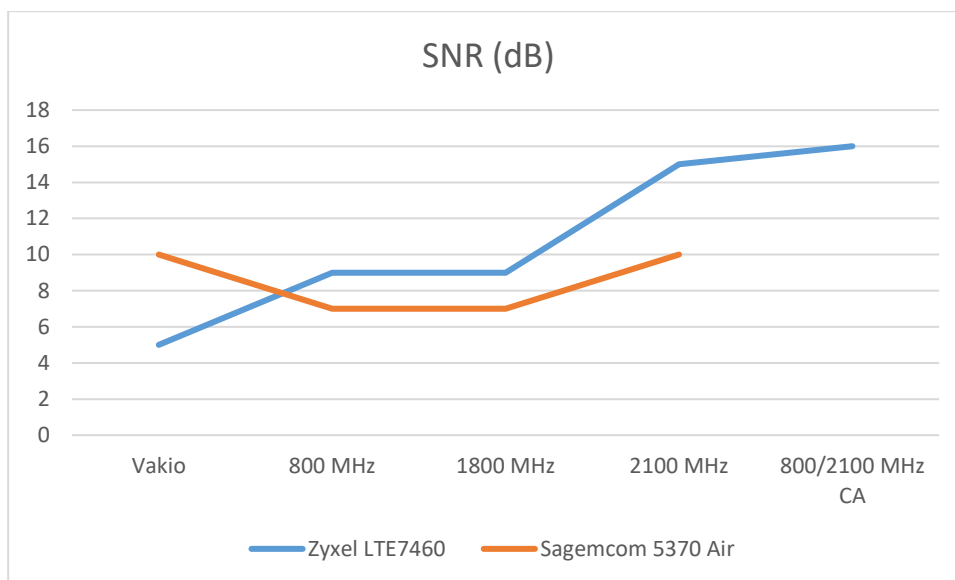


Kuva 47. Vasteaika eri asetuksilla ja taajuusalueilla 23.11.2019



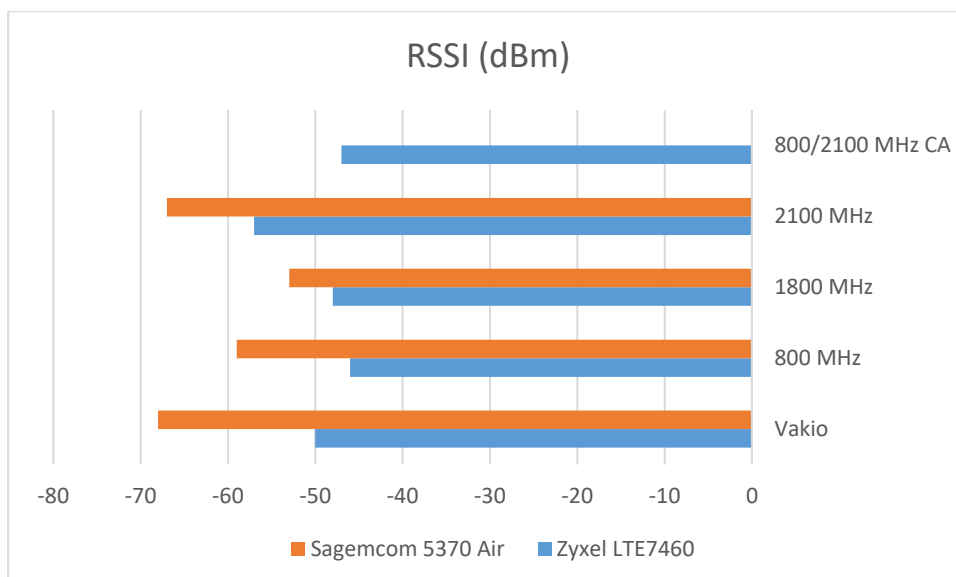
Kuva 48. Viiveen vaihtelu eri asetuksilla ja taajuusalueilla 23.11.2019

Signaaliarvojen eroavaisuudet laitteiden välillä olivat tällä kertaa selkeät. ZyXEL LTE7460 vastaanotti huomattavasti paremmin signaalin lähes jokaisessa testissä. Kuva 49 havainnollistaa signaalikohinasuhteen vaikutusta laitteisiin eri taajuusalueilla.



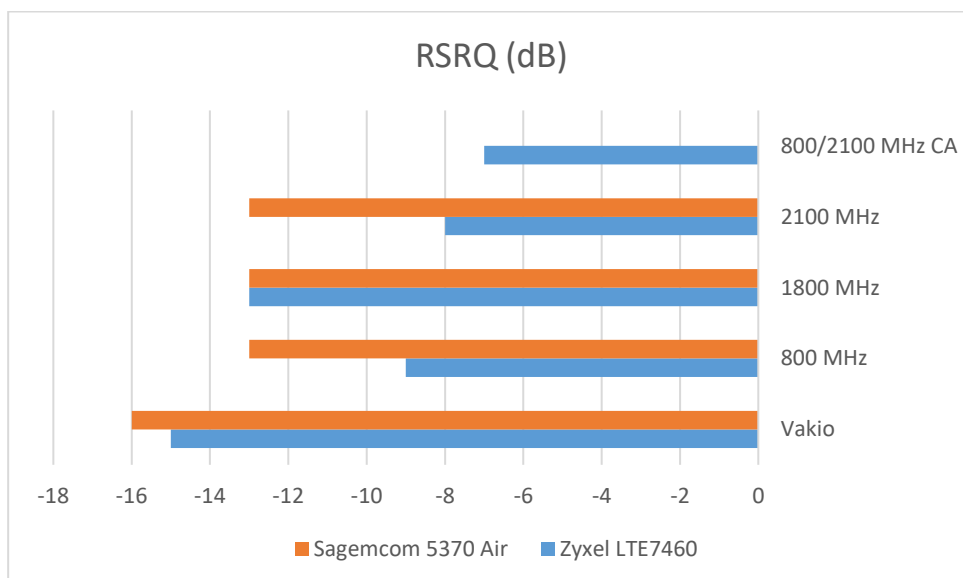
Kuva 49. SNR-arvot ZyXEL LTE7460- ja Sagemcom Fast 5370 Air-modeemeista 23.11.2019

Kuva 50 havainnollistaa vastaanotetun signaalin voimakkuutta.



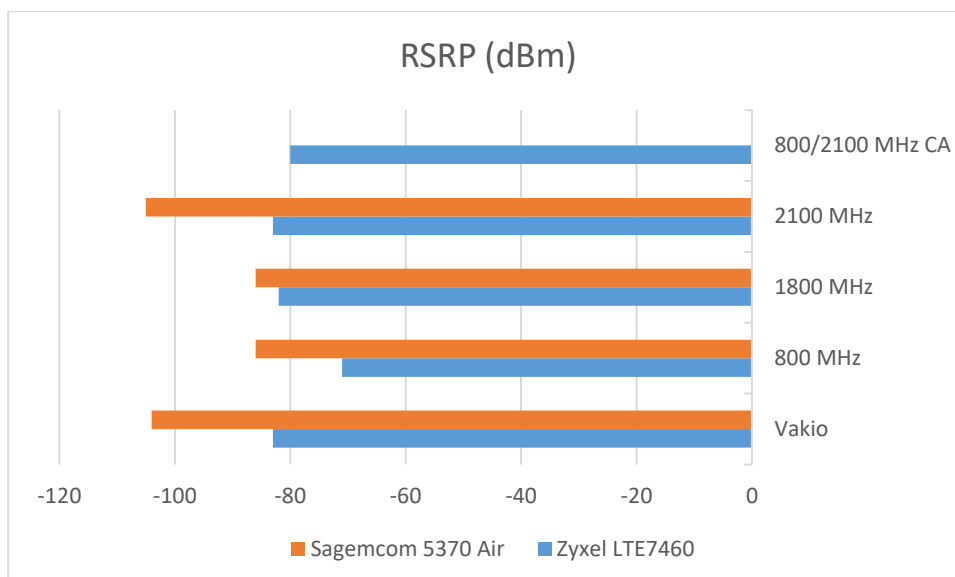
Kuva 50. RSSI-arvot ZyXEL LTE7460- ja Sagemcom Fast 5370 Air-modeeimeista 23.11.2019

Kuva 51 havainnollistaa vastaanotetun signaalin laatua.



Kuva 51. RSRQ-arvot ZyXEL LTE7460- ja Sagemcom Fast 5370 Air-modeeimeista 23.11.2019

Kuva 52 havainnollistaa vastaanotetun signaalin tehoa.



Kuva 52. RSRP-arvot ZyXEL LTE7460- ja Sagemcom Fast 5370 Air-modeemeista 23.11.2019

7.5 Päätelmiä ja johtopäätöksiä

Kuvasta 45 nähdään, että parhaimmat latausnopeudet saavutettiin ZyXEL LTE7460 modeemilla käyttämällä CA-tekniologiaa hyväkseen. Jopa ilman CA-tekniologiaa ZyXEL LTE7460 sai parempia tuloksia 800 MHz:n ja 2 100 MHz:n taajuusalueella kuin Sagemcom Fast 5370 Air. ZyXEL LTE7460 onkin huomattavasti kalliimpi vaihtoehto ulkoisten antennien ja modeemien joukossa, ja on enimmäkseen suunnattu yrityksille vaihtoehtoisen laajakaistan käyttöä varten, eikä niinkään kuluttajien kotiverkkoja varten. ZyXEL LTE7460 on tosin vain yksi vaihtoehto monien joukossa. Kannattavampi vaihtoehto olisi hankkia erillinen ulkoinen antenni ja käyttää sitä perinteisemmän modeemin kanssa modeemin sisäisten antennien sijaan. Tämä olisi huomattavasti kustannustehokkaampi vaihtoehto kuluttajille, mutta rajoittaa käytettävyyden modeemin omiin teknologioihin. Kuluttajille suunnatuissa modeemeissa ei välttämättä ole mahdollisuutta CA-tekniologialle, täten pahasti rajoittaen LTE-verkon teoreettista siirtonopeutta.

800 MHz:n ja 1 800 MHz:n taajuusalueilla saatiin suhteellisen huonoja latausnopeuksia molempien modeemien kannalta. Tämä johtuu osittain pitkästä välimatkasta palvelemaan tukiasemaan, mutta myös sen ruuhkautumisesta kyseisillä taajuusalueilla. 2 100 MHz:n taajuusalue osoittautui nopeimmaksi alueella, todennäköisesti johtuen sen vähäisemmästä käytöstä.

Häiriön määrä mobiiliverkossa ja pitkä etäisyys tukiasemaan oli hyvin havaittavissa testeissä. Sisätiloissa Sagemcom Fast 5370 Air ylsi parhaimmillaan vain 10 dB:n signaalikohinasuhteeseen, ja vastaanotetun signaalin laatu oli jatkuvasti erittäin huonolla -13 dB:n tai jopa huonommalla tasolla.

Käyttämällä ZyXEL LTE7460:n CA-teknologiaa 800 MHz:n ja 2100 MHz:n taajuusalueilla saavutettiin parhaimmat tulokset lähes jokaisessa testissä. ZyXEL LTE7460 saavutti CA-teknologialla huomattavasti nopeamman tuloksen 57,28 Mbps:n latausnopeudella ja 33,92 Mbps:n lähetysnopeudella verrattuna Sagemcom Fast 5370 Air:n 29,78 Mbps:n latausnopeuteen ja 26,06 Mbps:n lähetysnopeuteen. Tv-mastoon sijoitettuna ZyXEL LTE7460 sai myös jatkuvasti paremmat signaaliarvot kuin sisätiloissa sijaitseva Sagemcom Fast 5370 Air saavuttaen parhaimmillaan 16 dB:n signaalikohinasuhteen ja -47 dBm:n signaalinvoimakkuuden.

8 VERKON JAKO JA TESTAUS ERI KAAPELITEKNIKOILLA

8.1 Käytettävät laitteet ja kaapelointi

ZyXEL LTE7460:n yhteyden terminoitua talon tekniseen tilaan Ethernet-kaapelin kautta tulee käyttää reititintä, jossa on WAN-portti. Tähän valittiin Ubiquiti Edgerouter X sen pienen koon, hinnan ja laajan käyttötarkoituksen vuoksi. Edgerouter X -reititintä pystyy käyttämään normaaliin reitittämiseen käyttämällä laitteen suositeltua esiasennusta, minkä jälkeen asetuksiin ei enää tarvitse sen liiemmin koskea. Tätä asetusta käytettiin testeissä. Reititin toimii myös kytkimenä, sillä siinä on viisi gigabitin RJ45-porttia, joista neljää voi käyttää yhteyden jakamiselle.



Kuva 53. Ubiquiti Edgerouter X -asennus

Reitittimessä on myös mahdollisuus käyttää kahta eri virtalähdettä, Ethernet-portin kautta tai normaalin virtalähteen kautta. Laitteesta on myös mahdollisuus jakaa virtaa portin eth4 kautta, esimerkiksi wi-fi-tukiasemalle. Näitä ratkaisuja ei tosin sovelleta tässä työssä.

Kaapelointi tuli toteuttaa laitteiden sekä olosuhteiden vaatimusten mukaisesti. Cat5e/UTP-, Cat6/UTP-, Cat6/STP-, koaksiaali- ja sähkökaapelit valittiin käytettäviksi tiedonsiirtotekniikoiksi.

Koaksiaali- ja sähkökaapelien käyttäminen tiedonsiirtotekniikkoina vaati omat adapterit toimiakseen. Koaksiaalikaapelin adapteriksi valittiin goCoax MoCA 2.5 -Ethernet-adapterit (Multimedia Over Coaxial). Sähköverkon adapteriksi valittiin ZyXEL PLA4201 v2 powerline -Ethernet-adapterit.

8.2 Yhteyden jakaminen

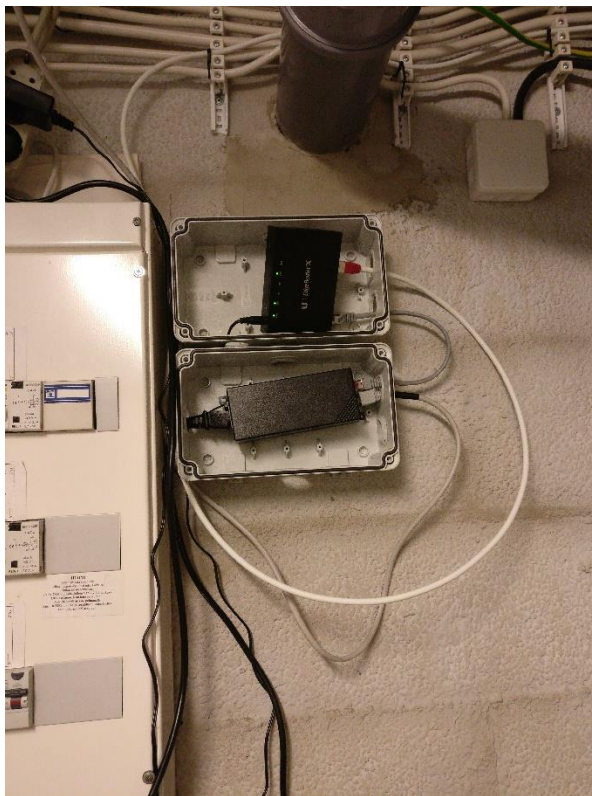
Yhteys päätettiin jakaa reitittimestä ympäri taloa integroimalla talon vanhoja kaapeleita verkkoon käyttämällä tv-kaapelia eli koaksiaalia, sähköverkkoa sekä asentamalla uutta Ethernet-kaapelia. Ethernet-tekniikka pystytään jakamaan ilman muita aktiivilaitteita, mutta vaatii hieman remontointia asukkaan osalta. Koaksiaali- ja sähköverkko vaatii aktiivilaitteet signaalin muuntamista varten.

Tv-kaapelin eli koaksiaalilin kautta yhteys jaettiin käyttämällä goCoax MoCA 2.5 -Ethernet-adapteria. Ethernet-kaapeli vedettiin reitittimestä MoCA-adapteriin josta signaali kuljetettiin talon koaksiaalikaapelointia pitkin tiettyyn pisteeseen, jossa se terminoituu toiseen MoCA-adapteriin.

Datasähkön eli sähköverkon kautta yhteyden jakaminen tapahtui käyttämällä ZyXEL PLA4201 v2 powerline -Ethernet-adaptereita. Ethernet-kaapeli vedetään reitittimestä adapteriin, josta signaali kulkee aktiivista sähköverkkoa toiselle adapterille.

8.3 Asennus ja kaapelointi

Reititin asennettiin talon tekniseen tilaan muovisiin kytkinrasioihin. ZyXEL LTE 7460 -modeemista tuleva Cat6/UTP-johto terminoituu PoE-injektoriin, josta lähtee erillinen Cat6/STP -Ethernet-kaapeli Ubiquiti Edgerouter X -reitittimeen. Tästä yhteyttä voidaan jakaa ympäri taloa käyttämällä reitittimen Ethernet-portteja. Kuvassa 55 näemme laiteasennukset kytkinrasioihin.



Kuva 54. Ubiquiti Edgerouter X -asennuspiste

Alkuperäinen kaapelointi tapahtui teknisestä tilasta suoraan yläpuolella olevaan huoneeseen käyttämällä Cat5e -Ethernet-kaapelia, josta jouduttiin katkaisemaan toinen RJ45-liittimistä pois vedon helpottamiseksi. Tämä tehtiin kaapelin asentamisen testaamiseksi, ja varmistukseksi siitä, että kaapeli säilyy ehjänä koko vedon läpi.



Kuva 55. Cat5e-asennus

Lopullinen Ethernet-kaapeloinnin asennus tehtiin käyttämällä Cat6/STP -Ethernet-kaapelia teknisen tilan ja sähkökaapelien aiheuttaman häiriön minimoiseksi. Kaapeli terminoitiin naaraspuoliseen seinäasennettavaan RJ45-liittimeen.



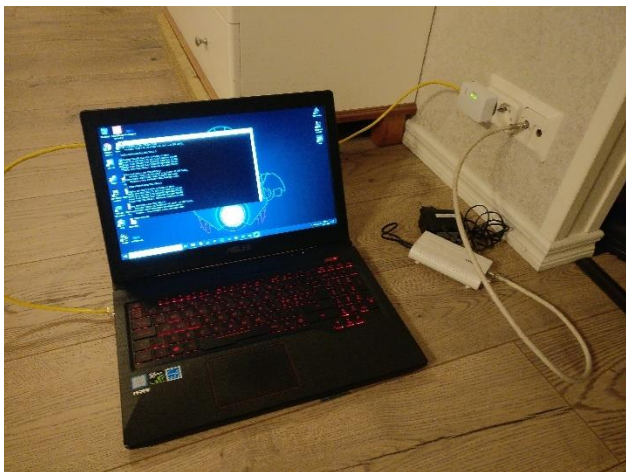
Kuva 56. Cat6/STP-asennus

MoCA-adapterien asennus tapahtui plug & play -periaatteella eikä laitteiden omiin asetuksiin tarvinnut koskea. Adapterit hyväksyvät vain koaksiaalikaapelin F-tyyppin liittimiä, eikä perinteinen tv-pistoke soveltunut tähän. Tämä saatiin ohitettua asentamalla kaapelin toiseen pätyyn F-liitin ja toiseen naaraspuolinen tv-kaapeli-liitin, jolloin myös vältettiin turha seinärasioiden irrottaminen.



Kuva 57. MoCA-adapterien asennus

ZyXEL PLA4201 v2 powerline -Ethernet-adapterien asennus tapahtui asentamalla adapteri haluttuun sähköpistokkeeseen, jolloin adapterit etsivät lyhyimmän reitin sähköverkkoa pitkin toiselle adapterille, ja alkoivat toimimaan automaattisesti.



Kuva 58. PLC-adapterin asennus

8.4 Testausmenetelmä

Eri fyysiset tiedonsiirtotekniikat testattiin iPerf3-työkalulla sekä perinteisellä komentokehoteen ping-komennolla. Testit toistettiin viisi kertaa ja tulosten keskiarvo laskettiin taulukkoon jakamalla tulosten summa testien määrällä. Testauksessa käytettiin kahta kannettavaa tietokonetta, joista toinen oli teknisessä tilassa vastaanottavana palvelimena ja toinen oli yläkerrassa lähettävänä päätelaitteena. Koneille määrättiin manuaalisesti IP-osoitteet 192.168.1.100 ja 192.168.1.101, missä .100-pääteinen osoite kuuluu palvelimelle ja .101-pääteinen lähettävälle päätelaitteelle. iPerf3-ohjelman avaaminen powershellissä tapahtuu shift+right click -näppäinyhdistelmällä ja klikkaamalla .exe tiedostoa. Testin käynnistäminen tapahtui käyttämällä lähettävästä koneesta komentoa `./iperf3.exe -c 192.168.1.100`. Tämän jälkeen koneet suorittivat testin, jonka tulokset kirjattiin ylös.

Toisena testinä koneet yhdistettiin teknisessä tilassa olevaan Edgerouter X -reitittimeen ja mitattiin vasteaika reitittimelle käyttämällä ping-komentoa reitittimen oletusyhdyskäytävän IP-osoitteeseen 192.168.1.1.



Kuva 59. Yhteyden siirtonopeuden testaus kahdella päätepisteellä

8.5 iPerf3- ja ping-mittaustulokset

Taulukosta 12 näemme, että käytetty Cat6/STP-kaapeli joka oli sertifioitu 1 Gbps:n nopeuksiin, yltää siihen varsin hyvin ottaen huomioon että liitännät olivat tehty itse. Kaistanleveys ylsi joka testissä teoreettiseen 950 Mbps:n maksimiinsa.

MoCA-adapterit ovat sertifioitu 2.5 Gbps:n nopeuksiin, mutta tässä tapauksessa siirtonopeus yltää koaksiaalikaapeloinnin kautta vain 313 Mbps:n nopeuksiin.

ZyXEL PLA4201 v2 -datasähkö-adapterit olivat sertifioitu 500 Mbps:n nopeuksiin, mutta ylsivät sähköverkon kautta vain 90,7 Mbps:n siirtonopeuteen.

Taulukko 13. iPerf3- ja ping-mittausten tulokset 15.11.2019

	Ethernet	Koaksiaali	Datasähkö
Kaistanleveys	930 Mbits/sec	313 Mbits/sec	90,7 Mbits/sec
Vasteaika	1ms	4ms	3ms

Syyt koaksiaalilin ja datasähkön hitauteen voivat olla monenlaisia. Laitteet voivat hidastaa yhteyttä huomattavasti tai talon sisäisten kaapelien laatu voi olla sen verran heikossa kunnossa, että tiedonsiirtokapasiteetti on heikentynyt.

8.6 Päätelmiä ja johtopäätöksiä

Mittaustulokset olivat kuitenkin kauttaaltaan suhteellisen hyviä niiden tarkoitukseen nähden. Ethernet ylsi teoreettiseen maksimiinsa, koaksiaali ja datasähkö saavuttivat lähes 100 Mbps:n tai suuremman siirtonopeuden. 100 Mbps:n tai suurempi siirtonopeus talouden valmiita kaapelointeja pitkin ei toki yllä 1 Gbps:n tavoitteeseen, mutta ottaen huomioon 1 Gbps:n laajakaistojen tarjonnan puutteen Suomessa, voidaan sanoa että nämä tulokset ovat käyttötarkoituksestaan riippuen varsin hyviä.

Taulukosta 13 nähdään että kaikkien ratkaisujen vasteaika pysyi varsin alhaisina, mikään ratkaisu ei lisännyt huomattavasti vasteaikaa yhteydelle. Tämä

selittynee kaapelivetojen lyhydellä. Ne muutamat millisekunnit mitä koaksiaalissa ja datasähkössä tuli lisää, johtuivat todennäköisesti adaptereiden tekemistä signaalinmuunnoksista.

9 YHTEENVETO

Opinnäytetyön ensimmäiseksi tavoitteeksi asetettiin radiotekniikkaan kuten 4G- ja 5G-verkkoihin perehtyminen, jotta radioverkon infrastruktuuri ja tietoliikennenopeuksiin vaikuttavat tekijät tunnettaisiin. Työssä esiteltiin lyhyesti LTE-verkon liityntäverkko E-UTRAN, ja siihen linkkaantuva EPC-runkoverkko. 4G- ja 5G-verkon lähetystekniikat sekä niihin vaikuttavat häiriötekijät käytiin lyhyesti läpi. LTE-verkossa käytetään orthogonal frequency division multiplex -modulaatioon liittyvää orthogonal frequency division multiple access -tekniikkaa, mikä mahdollistaa radiokanavien jaon sekä taajuus- että aikatasossa. Myös 5G-verkon liityntäverkko NG-RAN ja siihen linkkaantunva 5GC-runkoverkko esiteltiin. 5G tulee hyödyntämään uusia korkeampia taajuusalueita sekä useampia uusia teknologioita kuten beamformingia, small cell ja massive MIMO -tekniikkaa.

Tärkeitä datanopeuteen liittyviä tekijöitä ovat vastaanotetun signaalin voimakkuus ja laatu, tehokkaammalla signaalilla pystytään käyttämään tehokkaampia modulaatiotekniikoita kuten 64-QAM-modulaatio tai 256-QAM-modulaatio. Datanopeuteen vaikuttavat huomattavasti myös etäisyys tukiasemasta, verkon ruuhkautuminen, sekä vastaanottavan laitteen olosuhteet. Datanopeutta voidaan nostaa käyttämällä eri taajuusalueita ja samalla sulkemalla muita pois sekä käyttämällä ulkoisia antennejä. Datakapasiteettia voidaan nostaa esimerkiksi kantoaaltojen yhdistämisellä.

Toisena tavoitteena oli rakentaa modulaarinen verkko kotitalouteen Tuusulassa ilman kalliita remontteja tai laitteistoa. Työssä rakennettiin pienverkko, jonka suorituskykyä mitattiin sekä radiopuolella että fyysisellä puolella. Verkossa käytettiin ulos asennettava ZyXEL LTE7460-M608 -modeemia, sekä sisäkäyttöön tarkoitettua Sagemcom Fast 5370 Air -modeemia. Molempien modeemien vakioasetukset testattiin vertailukohteen luomiseksi. Tämän jälkeen testattiin 800 MHz:n, 1 800 MHz:n ja 2 100 MHz:n taajuusalueet, joissa jokaisesta testistä otettiin ylös saavutetut nopeudet sekä signaaliarvot.

Fyysisen verkon rakentamiseen käytettiin kolmea eri kaapelitekniikkaa: Ethernet-kaapelia, koaksiaalikaapelia sekä sähköverkon kaapelointia. Ethernet-teknikkaa käytettiin asentamalla uutta Cat6/STP-kaapelia teknisestä tilasta yläkertaan. Olemassa olevaa koaksiaalikaapelointia ja sähköverkon kaapelointia käytettiin yhdessä soveltuvien adapterien kanssa. Kaikkien kaapelitekniikoiden suorituskyky mitattiin iPerf3-ohjelmalla kahden tietokoneen välillä sekä komentokehotteen ping-komennolla reitittimen oletusyhdyskäytävän IP-osoitteeseen. Verkko saatiin rakennettua kustannustehokkaasti käyttäen olemassaolevia kaapelointeja ilman suurta hävikkiä tiedonsiirtokyvyssä, mutta 1 Gbps:n siirtonopeuden tavoitetta ei kaikilla kaapelitekniikoilla saavutettu.

Testauksien tuloksista huomataan, että moderni LTE-verkko ei pystynyt tuottamaan samankaltaisia vasteaikoja kuin fyysinen kupariverkko tai valokuitu, mutta pystyy hyvinkin korkeisiin siirtonopeuksiin verrattuna vanhentuvaan kupariverkkoon. 5G-verkon myötä tämä voi kuitenkin muuttua, sillä 5G-verkossa 1 ms:n vasteajat voivat olla jopa saavutettavissa ja datakapasiteetti kasvaa vielä suuremmaksi. 5G vähentäisi siis huomattavasti tarvetta suuren kapasiteetin fyysisille verkoille syrjäseuduilla.

Osa toista tavoitetta oli luoda helposti 5G-verkkoon päivitettävä verkko-ympäristö. Päivitystä ei vielä tehty 5G-laitteiston uutuuden takia ja koska hinnat ovat vielä niin korkealla että se ei ole vielä kannattavaa. Verkon yhteensopivuus on kuitenkin tarvittaessa valmis. Kun 5G tulee kuluttajille saataville kunnolla, voidaan asentaa uusi ulkoinen antenni tai modeemi, jonka kautta yhteys kulkee reitittimeen, ja sitä kautta talouden sisäverkkoon. 5G-verkon korkeampien taajuusalueiden ja niiden häiriöherkkyyden takia voidaan päätellä, että tulevaisuudessa ulkoiset antennit ja valmiiksi verkkokaapeloitu talous tulevat olemaan vielä kustannustehokkaampi ratkaisu laadukkaan signaalin vastaanottamiseen ja välittämiseen. Ulkoisen antennin ja verkko-kaapeloidun talouden avulla 5G-verkon signaali saadaan vastaanotettua ja välitettyä päätelaitteille mahdollisimman tehokkaasti ja häiriövapaasti. Mikäli 5G-verkon vasteaika päätelaitteille saadaan vähennettyä mainostettuun 1 ms:n, voidaan sanoa, että 5G kykenee korvaamaan perinteiset kupariyhteydet kotitalouksiin.

Voidaan sanoa, että työn testipaikkana toiminut kotitalous Tuusulassa edustaa hyvin tyypillistä taloutta ja olosuhteita mobiiliverkon käytössä. Palveleva tukiasema on kaukana vastaanottavasta päätelaitteesta ja alueella on kohtuullinen määrä radioliikennettä. Tämä antaa realistisen kuvan mobiiliverkon toiminnasta syrjäseuduilla, mutta saavutettujen tuloksien luotettavuus on silti tapauskohtaista. Mobiiliverkon tehokkuus riippuu päätelaitteen fyysisestä sijainnista ja sitä ympäröivistä olosuhteista. Talon kaapelitekniikoiden siirtonopeudet vaihtelevat myös tapauskohtaisesti. Kaikki tulokset ovat siis erilaisia eikä yhtä oikeaa vastausta ole. Tämä työ silti toimii hyvänä testipohjana mobiiliverkon toiminnalle syrjäseuduilla.

LÄHTEET

- Cox, C. 2014. An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE, VoLTE and 4G Mobile Communications. E-kirja. Englanti: Wiley. Saatavissa: <https://kaakkuri.finna.fi/> [viitattu 4.11.2019].
- Encyclopedia Britannica. 2019. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://kids.britannica.com/students/assembly/view/53869> [viitattu 5.12.2019].
- Hrasnica, H. Haidine, A. & Lehnert, R. 2004. Broadband Powerline Communications : Network Design. E-kirja. Englanti: John Wiley & Sons. Saatavissa: <https://kaakkuri.finna.fi/> [viitattu 14.11.2019].
- iPerf. s.a. iPerf user docs. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://iperf.fr/iperf-doc.php> [viitattu 20.11.2019].
- Kapilavai, S. 2019. Best Practises to Accelerate 5G Base Station Deployment: Your RF Front-End Massive MIMO Primer. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.qorvo.com/design-hub/blog/best-practices-to-accelerate-5g-base-station-deployment> [viitattu 21.11.2019].
- Kiinteiden ja mobiilien laajakaistaliittymien määriä. 2019. FiCom. WWW-dokumentti. Päivitetty 28.10.2019. Saatavissa: <https://www.ficom.fi/ict-ala/tilas-tot/kiinteiden-ja-mobiilien-laajakaistaliittymien-m%C3%A4%C3%A4ri%C3%A4> [viitattu 28.11.2019].
- RSRP (Reference Signal Received Power). s.a. LTE-Anbieter. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.lte-anbieter.info/technik/rsrp.php> [24.11.2019].
- RSRQ (Reference Signal Received Quality). s.a. LTE-Anbieter. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.lte-anbieter.info/technik/rsrq.php> [viitattu 24.11.2019].
- SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio). s.a. LTE-Anbieter. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.lte-anbieter.info/technik/sinr.php> [viitattu 24.11.2019].
- LTE Network Architecture. Tutorialspoint. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.tutorialspoint.com/lte/lte_network_architecture.htm
- Luo, F. & Zhang, C. 2016. Signal Processing for 5G: Algorithms and Implementations. E-kirja. Englanti: John Wiley & Sons. Saatavissa <https://kaakkuri.finna.fi/>
- Matkaviestinverkkojen taajuudet ja luvanhaltijat. 2019. Traficom. WWW-dokumentti. Päivitetty 19.09.2019. Saatavissa: <https://www.traficom.fi/fi/viestinta/viestintaverkot/matkaviestinverkkojen-taajuudet-ja-luvanhaltijat> [viitattu 5.11.2019].
- Nguyen, T. 2017. Small Cell Networks and the Evolution of 5G (Part 1). WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.qorvo.com/design-hub/blog/small-cell-networks-and-the-evolution-of-5g>. [viitattu 21.11.2019].

Oliviero, A. & Woodward, B. 2014. Cabling The Complete Guide to Copper and Fiber-Optic Networking (5th Edition). E-kirja. Englanti: Wiley. Saatavissa: <https://kaakkuri.finna.fi/> [viitattu 14.11.2019].

Perez, A. 2015. LTE & LTE Advanced. E-kirja. Englanti: Wiley. Saatavissa: <https://kaakkuri.finna.fi/> [viitattu 7.11.2019].

Rohde & Schwarz. 2012a. UMTS Long Term Evolution (LTE) Technology Introduction. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma111/1MA111_4E_LTE_technology_introduction.pdf [viitattu 6.11.2019].

Rohde & Schwarz. 2012b. Carrier Aggregation – (one) key enabler for LTE-Advanced. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/solution/wireless_and_mobile_communications/lte_lte_advanced/News-Advanced-Carrier-Aggregation.pdf [viitattu 6.11.2019].

Shepherd, P. 2018. Discover 5G Core Network Functions Compared to 4G LTE by Paul Shepherd. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.awardsolutions.com/portal/shareables/what-is-5G/5G-Training-Online/discover-5g-core-network-functions-compared-4g-lte> [viitattu 20.11.2019].

Share Technote. s.a. MIMO (Multiple Input Multiple Output). WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.sharetechnote.com/> [viitattu 21.11.2019].

Understanding RSSI. s.a. Metageek. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.metageek.com/training/resources/understanding-rssi.html> [viitattu 24.11.2019].

Wannstrom. J. 2013. Carrier Aggregation Explained. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/101-carrier-aggregation-explained>

3GPP RWS-180007. 2018. NR physical layer design. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1987-imt2020_workshop [viitattu 20.11.2019].

3GPP RWS-180008. 2018. NR physical layer design: NR MIMO. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1987-imt2020_workshop [viitattu 20.11.2019].

3GPP RWS-180009. 2018. NR architecture. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1987-imt2020_workshop [viitattu 20.11.2019].

3GPP RWS-180011. 2018. NR radio frequency and co-existence. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1987-imt2020_workshop [viitattu 20.11.2019].

3GPP TR 25.892. 2004. Feasibility study for Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) for UTRAN enhancement. (Release 6). WWW-dokumentti. Päivitetty 28.6.2004. Saatavissa: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/25_series/25.892/ [viitattu 4.12.2019].

3GPP TS 36.211. 2019. Physical channels and modulation. (Release 8). WWW-dokumentti. Päivitetty 28.9.2019. Saatavissa: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.211/ [viitattu 4.12.2019].

3GPP TS 36.300. 2019. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2. (Release 8). WWW-dokumentti. Päivitetty 26.9.2019. Saatavissa: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.300/ [viitattu 4.12.2019].

5GPP. 2019. View on 5G Architecture. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2019/07/5G-PPP-5G-Architecture-White-Paper_v3.0_PublicConsultation.pdf [viitattu 21.11.2019].

KUVALUETTELO

Kuva 1. Mobiililaajakaistaliittymät Suomessa tiedonsiirtosopimuksen mukaan (Ficom 2019)	8
Kuva 2. E-UTRAN-verkon arkkitehtuuri (3GPP TS 36.300 2019, 31).....	10
Kuva 3. EPC-verkon pääkomponentit	11
Kuva 4. FDD- ja TDD-tekniikkojen periaate.....	12
Kuva 5. QPSK-modulaation periaate (Cox 2014, 50)	14
Kuva 6. LTE:n käyttämät modulaatiotekniikat (Cox 2014, 51)	15
Kuva 7. OFDM-modulaation periaate (3GPP TR 25.892 2004, 10).....	16
Kuva 8. Esimerkki taajuuskaistan jaosta alikantoaalloiksi OFDM-tekniikassa	16
Kuva 9. Esimerkki symbolien välisestä häiriöstä	17
Kuva 10. Symbolien välisen häiriön väheneminen alikantoaaltoja käytettäessä	17
Kuva 11. Ykköstyyppin kehysten rakenne (3GPP TS 36.211 2019, 16).....	18
Kuva 12. Resurssilohkon periaate (3GPP TS 36.211 2019, 99).....	19
Kuva 13. Suojavälin ja syklisen prefiksin periaate	20
Kuva 14. Signaalikohinasuhteen vaikutus latausnopeuteen eri kantoaaltojen kaistanleveyksillä.....	22
Kuva 15. Rakentavan ja tuhoavan häiriön vaikutus vastaanotettavaan signaaliin (Encyclopedia Britannica s.a)	23
Kuva 16. Kantoaaltojen yhdistäminen eri menetelmillä (Wannstrom 2019)....	26
Kuva 17. Päätelaitteen käyttämä terminologia kaistayhdistelmille (Rohde & Schwarz 2012b)	26
Kuva 18. Esimerkki 5G-verkon ja LTE-verkon yhdistämisestä (3GPP RWS-180007 2018, 13)	28
Kuva 19. NG-RAN-verkon NSA arkkitehtuuri (3GPP RWS-180009 2018, 10)	28
Kuva 20. NG-RAN-verkon SA arkkitehtuuri (3GPP RWS-180009 2018, 6)....	29
Kuva 21. MME:n muutos 5GC-verkkoon (Shepherd 2018)	30
Kuva 22. S-GW:n ja P-GW:n muutos 5GC-verkkoon (Shepherd 2018)	30
Kuva 23. Eri taajuusalueiden kantavuus metreissä (5GPP 2019, 53)	31
Kuva 24. 128:n antennin Massive MIMO (Kapilavai 2019).....	32
Kuva 25. MIMO ja spatiaalinen multipleksaus (Share Technote s.a)	32
Kuva 26. Small cell arkkitehtuuri (5GPP 2019, 81).....	33
Kuva 27. Solujen käyttötarkoitukset (Nguyen 2017).....	34

Kuva 28. 5G taajuusalueiden allokointisuunnitelma (3GPP RWS-180011 2018, 4)	34
Kuva 29. 5G taajuusalueet ja kaistanleveydet (3GPP RWS-180007 2018, 4)	35
Kuva 30. 5G radiokehyyksen periaate (3GPP RWS-180007 2018, 6)	36
Kuva 31. Kantoaaltojen yhdistäminen symmetrisesti ja asymmetrisesti (3GPP RWS-180007 2018, 12)	36
Kuva 32. SSB:n rakenne (3GPP RWS-180007 2018, 36)	37
Kuva 33. Beamformingin periaate (3GPP RWS-180008 2018, 14)	38
Kuva 34. Cat5e/UTP -Ethernet-kaapeli	39
Kuva 35. Cat6/STP -Ethernet-kaapeli	40
Kuva 36. Koaksiaalikaapeli.....	41
Kuva 37. iPerf-ohjelman periaate (iperf.fr s.a)	43
Kuva 38. iPerf3-ohjelman esimerkki tulos, Ethernet-kaapeli.....	43
Kuva 39. Tukiaseman ja testipaikan välinen matka (Google Maps 2019)	45
Kuva 40. ZyXEL LTE7460-M608 -modeemin asennus 2.11.2019.....	46
Kuva 41. DNA nopeustestin esimerkkitulokset, modeemi ZyXEL LTE 7460	47
Kuva 42. Mittauskytkentä 23.11.2019	47
Kuva 43. Sagemcom Fast 5370 Air testaus 23.11.2019	48
Kuva 44. ZyXEL LTE7460 Carrier Aggregation 23.11.2019	49
Kuva 45. Download-nopeus eri asetuksilla ja taajuusalueilla 23.11.2019	50
Kuva 46. Upload-nopeus eri asetuksilla ja taajuusalueilla 23.11.2019	51
Kuva 47. Vasteaika eri asetuksilla ja taajuusalueilla 23.11.2019.....	51
Kuva 48. Viiveen vaihtelu eri asetuksilla ja taajuusalueilla 23.11.2019	52
Kuva 49. SNR-arvot ZyXEL LTE7460- ja Sagemcom Fast 5370 Air-modeemeista 23.11.2019	52
Kuva 50. RSSI-arvot ZyXEL LTE7460- ja Sagemcom Fast 5370 Air-modeemeista 23.11.2019	53
Kuva 51. RSRQ-arvot ZyXEL LTE7460- ja Sagemcom Fast 5370 Air-modeemeista 23.11.2019	53
Kuva 52. RSRP-arvot ZyXEL LTE7460- ja Sagemcom Fast 5370 Air-modeemeista 23.11.2019	54
Kuva 53. Ubiquiti Edgerouter X -asennus.....	56
Kuva 54. Ubiquiti Edgerouter X -asennuspiste	57
Kuva 55. Cat5e-asennus.....	58
Kuva 56. Cat6/STP-asennus	58
Kuva 57. MoCA-adapterien asennus.....	59

Kuva 58. PLC-adapterin asennus.....	59
Kuva 59. Yhteyden siirtonopeuden testaus kahdella päätepisteellä.....	60

TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1. Matkaviestinverkkojen taajuudet ja luvan haltijat Suomessa (Traficom 2019)	13
Taulukko 2. LTE taajuuskaistojen numerointi eri taajuusalueille	13
Taulukko 3. RSRP:n arviointi (RSRP. LTE-Anbieter s.a)	23
Taulukko 4. RSRQ:n arviointi (RSRQ. LTE-Anbieter s.a).....	24
Taulukko 5. SNR:n arviointi (SNR. LTE-Anbieter s.a)	24
Taulukko 6. RSSI:n arviointi (Metageek s.a)	24
Taulukko 7. Kaistanleveyden vaikutus alikantoaaltojen määrään (Perez 2015, 120)	25
Taulukko 8. Päätelaitteen CA-kaistanleveysluokat (Rohde & Schwarz 2012b)	27
Taulukko 9. Eri solujen tehokkuudet (Nguyen 2017)	34
Taulukko 10. Logaritminen vaikutus tehoon (Oliviero & Woodward 2014, 40)	39
Taulukko 11. Mittaustulokset eri asetuksilla ja taajuuksilla 23.11.2019	48
Taulukko 12. ZyXEL LTE7460 Carrier Aggregation (23.11.2019)	50
Taulukko 13. iPerf3- ja ping-mittausten tulokset 15.11.2019	61