

VoNR-toiminnallisuuden lisääminen 5G FDD KPI -testaamiseen



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Tieto- ja viestintäteknikka, insinööri (AMK)

Kevät, 2023

Ossi Rinta-Pollari

Tieto- ja viestintätekniiikan koulutusohjelma

Tekijä Ossi Rinta-Pollari

Työn nimi VoNR-toiminnallisuuden lisääminen 5G FDD KPI -testaamiseen

Ohjaajat Marko Grönfors, Juha Kaura

Tiivistelmä

Vuosi 2023

TIIVISTELMÄ

Tämä opinnäytetyö esittelee tutkimuksen ja toteutuksen VoNR (Voice over New Radio) -toiminnallisuuden integroimisesta 5G FDD KPI -testiympäristöön. Tutkimuksen ensisijaisena tavoitteena oli lisätä puhepalvelu 5G-verkkoihin, mikä on haastava tehtävä 5G-tekniikan monimutkaisuuden ja dynaamisen luonteen vuoksi. Tavoitteen saavuttamiseksi tutkimuksessa käytettiin erilaisia menetelmiä ja tekniikoita, kuten käyttölaitteiden konfigurointi tiettyjä testitapauksia varten, tukiasemien parametrisoinnin muokkaaminen VoNR-ominaisuuden aktivoimiseksi sekä puhelunmuodostuslokien ja pakettikaappausten analysointia, jotta nähdään toimintojen tapahtuvan 5G-tasolla.

Tutkimuksessa löytyi liikkuvuuteen liittyvä ongelma testattaessa tiettyä laitteistoyhdistelmää VoNR- ja DSS (Dynamic Spectrum Sharing) -ominaisuuden kanssa. Ratkaisu ongelmaan löydettiin analysoimalla lokeja tarkemmin ja käyttämällä edistyneitä virheenkorjaustyökaluja. Opinnäytetyön aihe tuli esimieheltäni Juha Kauralta, joka esitti ajatuksen kehittää entistä monipuolisempi testiympäristö todellisia olosuhteita vastaavaksi.

Tutkimuksen toteutus onnistui ja lopputyö lisättiin toimeksiantajan Nokia Solutions and Networks viralliseen testiin. Tämän opinnäytetyön tuloksilla on vaikutuksia VoNRin kehittämiseen, joka ei ole vielä täysin kaupallisesti saatavilla. Tutkimus auttoi edistämään puhepalveluiden kehitystä 5G-verkoissa.

Avainsanat VoNR, 5G NR, FDD, KPI

Sivut 38 sivua

ABSTRACT

This thesis presents a study and implementation on the integration of VoNR (Voice over New Radio) functionality into a 5G FDD KPI test environment. The primary objective of the research was to add voice services in 5G networks, a challenging task given the complexity and dynamic nature of 5G technology. To achieve this goal, the study employed various methods and techniques such as configuring user equipment for specific test cases, modifying the parameterization of base stations to activate the VoNR feature, and analyzing call setup logs and packet captures to understand the operations taking place at the 5G layer.

The research revealed a mobility-related bug when testing with a certain hardware combination with VoNR and DSS (Dynamic Spectrum Sharing) feature. However, by analyzing logs more carefully and by making use of advanced debugging tools, a solution to the problem was found. The topic of the thesis came from my supervisor Juha Kaura, who proposed the idea of developing a more versatile test environment to reflect real-world conditions.

The implementation of the research was successful, and the final work was added to the official test of the client, Nokia Solutions and Networks. The outcome of this thesis has implications for the development of VoNR, which is not yet fully commercially available. The research helped promote the development of voice services in 5G networks.

Keywords VoNR, 5G NR, FDD, KPI
Pages 38 pages

Termit ja lyhenteet

Lyhenne	Englanti	Selitys
3GPP	3rd Generation Partnership Program	Kansainvälinen standardisointiorganisaatio, joka kehittää spesifikaatioita matkapuhelinjärjestelmille
4G	4th Generation	Neljännän sukupolven matkapuhelinverkko.
5G	5th Generation	Viidennen sukupolven matkapuhelinverkko.
5GC	5G Core	5G-verkon keskusjärjestelmä
AMF	Access and Mobility Management	5G-verkon hallintafunktio, hallinnoi pääsyn mobiiliverkkoon ja varmistaa yhteyksien jatkuvuuden.
CP	Control Plane	Verkon hallintataso.
DL	Downlink	Tietoliikenteen suunta, jossa tiedonsiirto tapahtuu tukiasemasta käyttäjälaitteeseen
DRB	Data Radio Bearer	5G-verkossa käytetty tiedonsiirron kuljetusväylä, joka tarjoaa tiedonsiirron eri sovellusten ja laitteiden välillä.
DSS	Dynamic Spectrum Sharing	Tekniikka, joka mahdollistaa LTE:n ja 5G:n rinnakkaiskäytön samalla taajuudella
eMBB	Enhanced Mobile Broadband	5G-tekniikan käyttötapa, joka tarjoaa laajempaa ja tehokkaampaa mobiililaajakaistaa.
EPC	Evolved Packet Core	4G-verkon keskusjärjestelmä.
FDD	Frequency Division Duplex	Tietoliikenteessä käytetty kaksisuuntainen menetelmä, jossa taajuuskaista jaetaan kahteen erilliseen kaistaan lähettämistä ja vastaanottamista varten.
gNB	gNode-B	5G tukiasema
GTP	GPRS Tunneling Protocol	Protokolla, jota käytetään siirtämään tietoa matkapuhelinverkoissa.
IMS	IP Multimedia Subsystem	Arkkitehtuuri ja protokolla, joka mahdollistaa erilaisten multimedialaitteiden käytön internetprotokollan päällä.
IMSI	International mobile subscriber identity	Matkapuhelinliittymän tunnistenumero
KPI	Key Performance Indicator	Mittari, jolla mitataan ja seurataan tärkeiden teknisten ja liiketoiminnallisten suorituskykyindikaattoreiden toteutumista.
LTE	Long-Term Evolution	Nimitys 4G:lle
MCC	Mobile Country Code	Kansallinen tunniste, joka määrittelee maan, jossa matkapuhelinliittymä on rekisteröity.
mMTC	Massive Machine-Type Communications	5G käyttötapa, joka tähtää tukemaan suurta määrää matalatehoisia laitteita.

MNC	Mobile Network Code	Operaattoritunnus, joka määrittelee matkapuhelinliittymän kuuluvuusalueen operaattorin.
NR	New Radio	Nimitys 5G:lle
NSA	Non Standalone	5G-verkkojen jakelujärjestelmä, jossa 5G-verkko on yhteydessä olemassa olevaan 4G-verkkoon.
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	Digitaalisen signaalin jakamismenetelmä, joka jakaa tiedonsiirron usealle taajuuskanavalle ortogonaalisesti
PDU	Protocol Data Unit	Tietoyksikkö, joka välitetään tietoliikenneprotokollan kerrosten välillä.
RACH	Random Access Channel	Kanava matkaviestinjärjestelmässä, jonka avulla matkapuhelin voi pyytää pääsyä verkkoon.
RAN	Radio Access Network	Telekommunikaation osa, joka yhdistää matkaviestinlaitteen runkoverkkoon.
RRC	Radio Resource Control	Protokolla matkaviestinjärjestelmässä, joka hallitsee radioresurssien asetusta, konfiguraatiota ja vapauttamista.
SA	Standalone	5G-verkon arkkitehtuuri, jossa 5G:n keskusverkko on riippumaton olemassa olevasta 4G:n keskusverkosta.
SBA	Service Based Architecture	Verkon arkkitehtuuri, jossa verkon toiminnot on jaettu eri palveluihin.
SMF	Session Management Function	5G verkoissa oleva verkko-ominaisuus, joka vastaa käyttäjalaitteiden ja 5G-runkoverkon välisten istuntojen hallinnoinnista.
TDD	Time Division Duplex	Kaksisuuntainen viestintämenetelmä, joka mahdollistaa DL:n ja UL:n toimivuuden samalla taajuudella
UL	Uplink	Tietoliikenteen suunta, jossa tiedonsiirto tapahtuu käyttölaitteesta tukiasemaan
UP	User Plane	Tietoliikenneverkon osa, joka kuljettaa käyttäjän tietoa ja liikennettä
VoLTE	Voice Over Long-Term Evolution	Tekniikka, joka mahdollistaa äänipuhelun 4G-verkossa.
VoNR	Voice over New Radio	Tekniikka, joka mahdollistaa äänipuhelun 5G-verkossa

Sisällys

1	Johdanto	1
2	5G yleisesti.....	1
3	Runkoverkko	4
3.1	5G-runkoverkko	6
3.1.1	AMF	10
3.1.2	SMF.....	10
3.1.3	IMS-runkoverkko	11
3.2	SA ja NSA	12
4	VoNR.....	14
5	Tukiasema.....	15
5.1	Parametrisointi.....	19
5.2	Ominaisuuksien aktivointi.....	19
6	Käyttölaitteet.....	20
6.1	SIM-kortti	21
6.2	Konfigurointi testiympäristöön.....	21
7	Kenttätestaus	23
7.1	Työkalut.....	24
7.2	Tulosten analysointi	25
8	KPI.....	25
8.1	Saavutettavuus.....	26
8.2	Säilytettävyyys.....	29
8.3	Liikkuvuus.....	29
8.4	Tiedonsiirtokapasiteetti	30
9	Toteutus ja yhteenveto	31
	Lähteet.....	35

1 Johdanto

Puheviestintä on välttämätön komponentti palveluntarjoajille. Neljännen sukupolven matkapuhelinverkon (4G) yleistyessä, puheviestintää varten otettiin käyttöön IMS (IP-Multimedia Subsystem) -runkoverkko, ja samaa arkkitehtuuria käytetään viidennen sukupolven matkapuhelinverkossa (5G) (Nokia, n.d). 5G:n laajeneminen pakottaa operaattorit suunnittelemaan puhepalvelut uuden teknologian päälle, eli VoNR (Voice over New Radio) -ominaisuuden täytyy olla osa 5G SA (Standalone) strategiaa. VoNR on 5G-tekniikka, jota käytetään äänipuhelujen välittämiseen 5G-NR (New Radio) -ilmarajapinnan kautta, joka on suunniteltu tukemaan korkeampia tiedonsiirtonopeuksia ja pienempää latenssia kuin aikaisemmat matkapuhelinverkot. VoNR edustaa merkittävää kehitystä tavassa, jolla puhelut siirretään matkaviestinverkoissa, tarjoten parempaa puhelun laatua, verkon tehokkuutta, ominaisuuksia ja kattavuutta. 5G-runkoverkon tuki on avainasemassa VoNRin käyttöönotossa, tämän hyöty on se, ettei puhepalveluiden tarvitse reitittyä 4G-runkoverkon kautta ja asiakas saa käyttöönsä 5G-runkoverkon tarjoamat hyödyt.

Tässä opinnäytetyössä on tarkoituksena konfiguroida ja testata VoNR-toiminnallisuus Nokian 5G FDD KPI -testiympäristöön, joka koostuu kolmesta eri 5G tukiasemasta. Ajotestissä autoon on sijoitettu käyttölaitteita, jotka generoivat tietoliikennettä erilaisilla tiedonsiirtoprofiileilla. Testin tarkoituksena on simuloida oikeaa tilannetta tukiasemien kuormituksen suhteen, ja testauksen jälkeen tukiasemilta kerätään laskureiden muodostama data niiden analysointia varten. Työ koostuu VoNR-ominaisuuden aktivoinnista muokkaamalla tukiaseman parametrisointia, jotta käyttölaite tekee puhelun muodostuessa vaadittavat signaaloinnit NR-tasolla äänensiirtoa varten. Työtä varten on tilattu kaksi Nokia XR20 -puhelinta, jotka vaativat myös omat toimenpiteet tukeakseen VoNR-puheluita. Puhelimiin asetettujen SIM-korttien tilaus täytyy myös varmistaa 5G-runkoverkon puolelta, jotta puhelin pystyy suorittamaan äänipuhelun täysin 5G-teknologialla. Lopullinen työ on tarkoitus lisätä Nokian viralliseen 5G FDD KPI -testiympäristöön.

2 5G yleisesti

5G on viidennen sukupolven matkapuhelinverkko. Se on 4G-verkon jälkeen seuraava globaali langaton viestintäteknologian standardi, jonka tavoitteena on palvella suurempia määriä

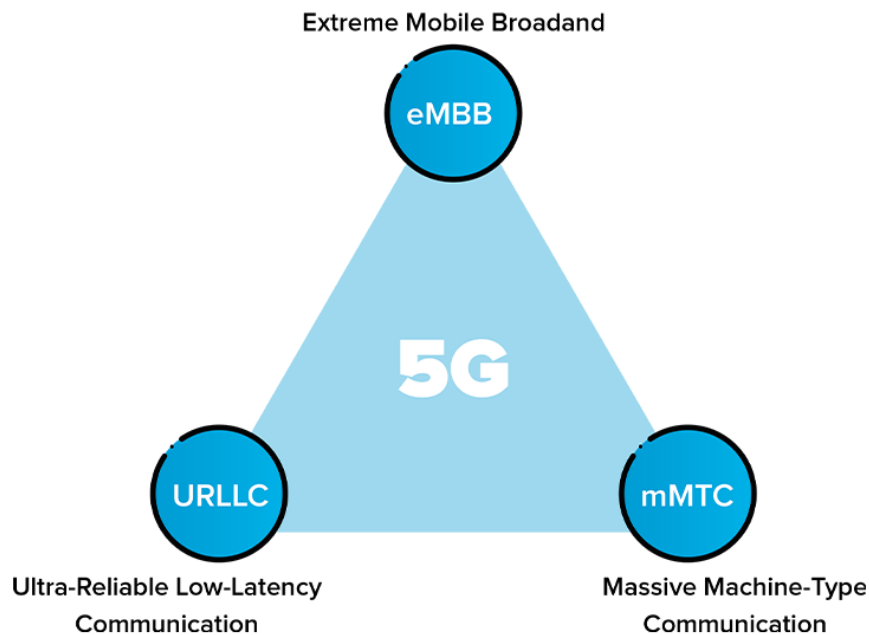
laitteita, kuin aikaisemmat matkapuhelinverkot. Langattomalle 5G-tekniikalle on asetettu korkeita tavoitteita (Kuva 1):

- Korkea tiedonsiirtonopeus
- Alhainen latenssi
- Suurempi luotettavuus ja kapasiteetti
- Parempi saavutettavuus
- Yhtenäisempi käyttökokemus

Näiden tavoitteiden tarkoitus on antaa uusia käyttökokemuksia ja yhdistää uusia toimialoja. (Qualcomm, n.d.)

5G käyttää useita teknologioita ja tekniikoita parantaakseen suorituskykyä, mukaan lukien korkeampien taajuuksien radiokaistoja, kehittyneempiä antennitekniikoita ja tehokkaampaa spektriresurssien käyttöä. Näiden tekniikoiden avulla 5G-verkot voivat tukea aiemmin mainittuja tavoitteita. 5G-verkot on suunniteltu joustavammaksi ja skaalautuvammaksi kuin aikaisemmat mobiiliteknologian sukupolvet. 5G-tekniikalla odotetaan olevan keskeinen rooli uusien teknologioiden ja palveluiden, kuten älykkäiden kaupunkien, etäterveydenhuollon ja autonomisten ajoneuvojen kehittämisen mahdollistamisessa. (Saxen, 2019)

Kuva 1. 5G:n tavoitteet (Reply, n.d.)



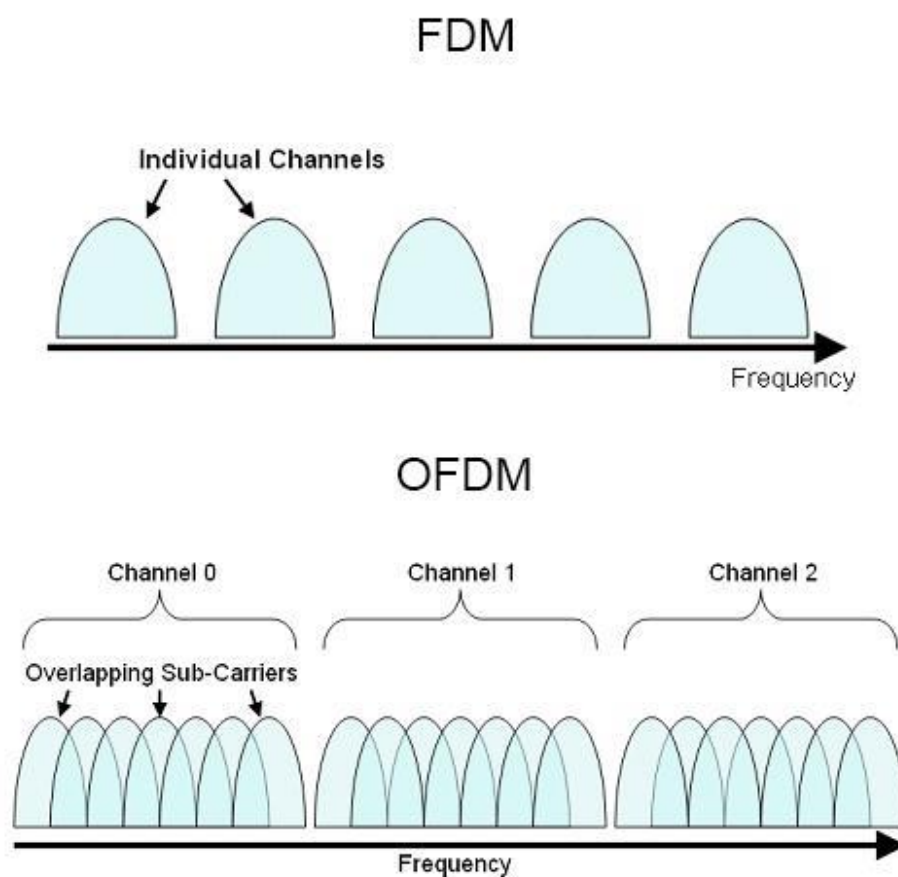
5G perustuu OFDM:ään (Orthogonal Frequency-division Multiplexing), joka on menetelmä signaalin moduloimiseksi useiden eri kanavien kautta tarkoituksena vähentää häiriöitä. 5G:ssä on myös käytössä laajempia kaistanleveysteknologioita, kuten alle 6 GHz ja mmW (millimeter Waveform). OFDM:n kaistarajoitetut ortogonaaliset signaalit voidaan yhdistää melkein päällekkäin välttämällä samalla kanavien väliset häiriöt. Tätä teknologiaa käyttämällä voi luoda joukon alikantoaaltoja (engl. Subcarriers), jotka kaikki toimivat yhdessä välittääkseen tietoa useilla eri taajuuksilla. (Witte, 2020)

OFDM:ää on käytetty 4G:ssä DL (Downlink) -kaistoilla, mutta 5G:ssä tätä käytetään ensimmäistä kertaa myös UL (Uplink) -kaistoilla. OFDM:lla voidaan osoittaa olevan selvästi parempi suorituskyky kuin 4G UL-kaistalla käytetyssä SC-FDMA:lla (Single Carrier-Frequency Division Multiple Access) erityisesti moniantennilähetysellä ja korkeamman asteen modulaatiolla. Moniantennin UL-lähetystä ei otettu käyttöön 4G:n aikana. Pyrkimys suurempaan datanopeuteen 5G:ssä on syy miksi OFDM on suositeltu 5G UL:ssä. (Holma, 2019, ss. 39-40)

FDM (Frequency-Division Multiplexing), suomeksi taajuusjakokanavointi on kanavoitintekniikka, jossa käytettävissä oleva taajuusalue on jaettu kapeampiin kaistoihin, joiden välissä on suoja-kaista häiriön välttämiseksi. Kapeampia kaistoja käytetään erillisinä

kanavina. OFDM:ssä lähetysspektri on jaettu taajuuskaistoihin. Tässä tietoliikenne jaetaan useisiin tietokanaviin ja lähetetään useilla kanavilla häiriöiden vähentämiseksi. Kanavat ovat itsenäisiä ja käyttävät erilaisia siirtotiloja, kuten lähetyssopeuksia tai modulaatiotyyppisiä. Lähetyssien yläpäässä yksittäiset kanavat suodatetaan pois multipleksoiduista signaalista demultiplekserillä. Optiset verkot, kuten runkoverkko, käyttävät OFDM-järjestelmiä (Devopedia, 2020). OFDM:ssä spektritehokkuus on korkeampi kuin FDM:ssä (Kuva 2.).

Kuva 2. FDM ja OFDM monikantoaalto modulaatioiden vertaus (Devopedia, 2020)



3 Runkoverkko

Runkoverkko on verkon osa, joka tarjoaa olennaiset palvelut ja infrastruktuurin, jotka tukevat koko verkkoa. Se on taustalla oleva verkko, joka yhdistää tietoliikennejärjestelmän eri komponentit ja tarjoaa alustan sen päällä toimiville erilaisille palveluille ja sovelluksille. Runkoverkko koostuu tyypillisesti suurikapasiteettisista, nopeista verkkoelementeistä, kuten

kytkimistä, reitittimistä ja muista verkkolaitteista, jotka vastaavat tiedon reitittämisestä ja kytkentäfunctioista verkon eri osien välillä. Se on tietoliikennejärjestelmän selkäranka, joka tarjoaa tarvittavat liitännät ja infrastruktuurin äänen, datan ja muiden palveluiden tukemiseen. Runkoverkko on välttämätön osa usealle toiminnalle, jota matkapuhelimilla suoritetaan. Runkoverkon tehtävä on yhdistää matkapuhelimet ulkoisiin verkkoihin. Matkapuhelinverkot koostuvat arkkitehtuuriltaan useista keskeisistä kokonaisuuksista. Riippuen käytettävästä verkkotekniikasta, arkkitehtuuri näyttää hyvinkin erilaiselta esimerkiksi 4G:n ja 5G:n runkoverkkojen välillä (Ghayas, 2019).

Runkoverkko keskittyy pitkän matkan ja suuren mittakaavan tietoliikenteen suorituskyvyn ja luotettavuuden optimointiin. Ne yhdistävät RAN- ja LAN-verkkoja. Vaikka runkoverkot tarjoavat monia palveluita, yksi niiden tärkeimmistä tehtävistä on puhelujen reitittäminen puhelinverkon kautta. Lisäksi runkoverkko tarjoaa reitit tiedonvaihtoon eri aliverkkojen välillä. 4G:n runkoverkkoa kutsutaan EPC:ksi (Evolved Packet Core) ja 5G:n runkoverkkoa 5GC:ksi (5G Core). (Techopedia, n.d.)

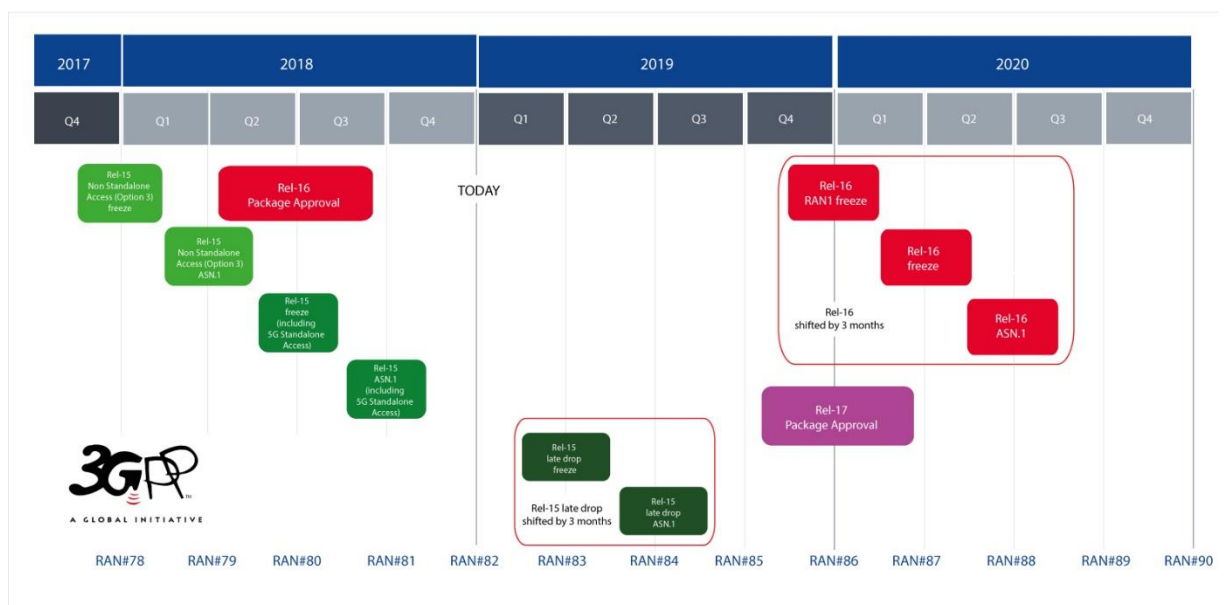
Runkosolmut (Core Nodes) tarjoavat korkean tason aggregaatiota palveluntarjoajan verkossa (engl. Service Provider Network). Aggregoinnin tarkoitus on käyttää eri tekniikoita useiden verkkolinkkien yhdistämiseksi samanaikaisesti suorituskyvyn parantamiseksi. Autentikointi on myös runkoverkon tehtävä. Runkoverkon laitteet voivat määrittää, saako tietoliikenneverkosta palvelua vaativa käyttäjä suorittaa tehtävänsä kyseisessä verkossa. Puhelun ohjaus- tai kytkentätoiminto määrittää puhelun jatkokulun signaaloinnin mukaisesti. Kytkentätoiminto voi määrittää soitetun numeron perusteella, tuleeko puhelu reitittää tilaajalle verkko-operaattorin tutkan sisällä vai numeron siirrettävyyden avulla useammin toiseen suojattuun verkkopalveluun. Runkoverkossa yhdyskäytävät toimivat kanavina muihin verkkoihin. Niiden toiminnallisuus riippuu verkon tyypistä, johon ne ovat liittymässä.

OAM-komponentti (Operations, Administration and Maintenance) on runkoverkon osa, joka seuraa reaaliajassa häilytyksiä, statistiikkaa ja seuranta jälkiä. Näitä seuraamalla operaattorit voivat tutkia verkon suorituskykyä ja valvoa kuntoa (Tata Communications, 2022).

3.1 5G-runkoverkko

5G-järjestelmän arkkitehtuuri on määritelty tukemaan datayhteyksiä ja palveluita, jotka mahdollistavat uusien tekniikoiden käytön, esimerkiksi NFV (Network Function Virtualization) ja SDN (Software Defined Networking). 5G järjestelmän tekniset eritelmät 5G-runkoverkolle ovat julkaistu 3GPP (3rd Generation Partnership Project) julkaisussa 15 (Kuva 3.).

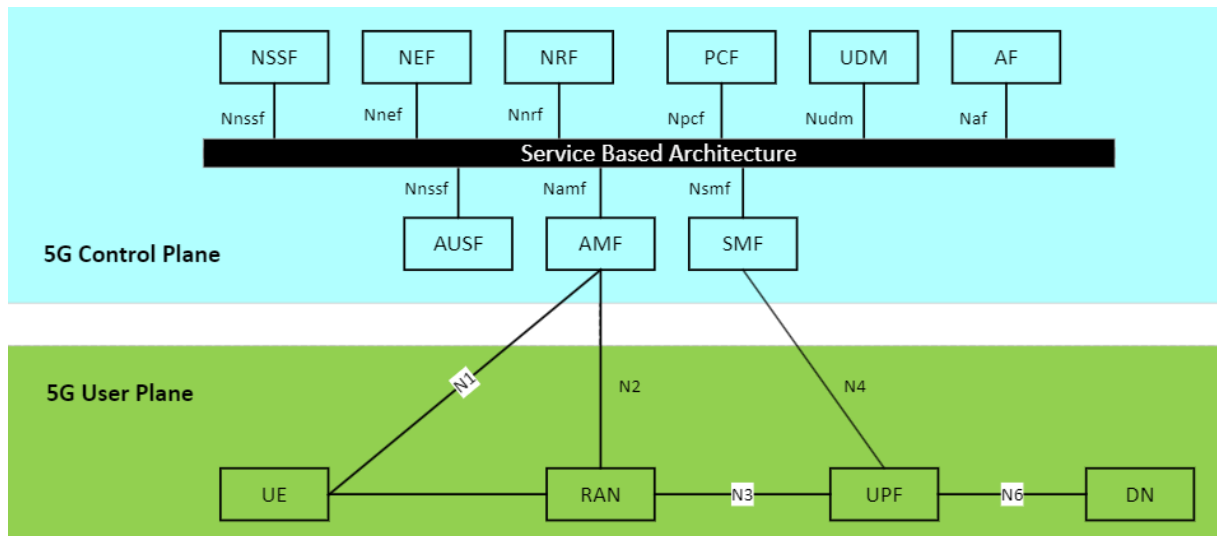
Kuva 3. 3GPP julkaisusuunnitelma 5G:lle (3GPP, 2018)



3GPP on antanut määritelmät ilmarajapinnoille, protokollille ja verkkoliitännöille, jotka mahdollistavat puheluiden ja istuntojen ohjauksen, liikkuvuuden hallinnan ja palveluntarjoamisen. 5G määritellään useissa vaiheissa. 3GPP:n julkaisussa 15 määritellään 5G:n ensimmäinen vaihe, jossa esitellään uusi radiolähetystekniikka ja muita käsitteitä, kuten toimialatason luotettavuus, laajennettu modulaarisuus ja nopeampi vasteaika. 5G on suunniteltu otettavan käyttöön myös teollisuuden aloilla autonomisuuden edistämiseksi, toisin kuin aikaisemmat matkapuhelinverkot, jotka on pääsääntöisesti ollut kuluttajakäytössä, koska 4G ei pysty 5G:n tavoin vastaamaan jatkuvasta uusien älylaitteiden lisäämisestä verkkoon. 5G parantaa 4G-palveluita usealla tavalla, kuten eMBB (Enhanced Mobile Broadband), URLLC (Ultra Reliable and Low Latency Communications) ja mMTC (Massive Machine-type Communications). 5G-runkoverkon arkkitehtuuri perustuu SBA (Service-Based Architecture) -kehukseen (Kuva 4), jossa sen elementit määritellään verkkotoimintojen (engl. Network Functions) perusteella. Yhteisen viitekehysten rajapintojen kautta mikä tahansa verkkotoiminto voi tarjota palvelujaan kaikille muille valtuutetuille verkkotoiminnoille ja kaikille kuluttajille, jotka ovat autentikoitu käyttämään näitä palveluita (Sultan, 2022).

Yksi suuri ero 4G:n ja 5G:n välillä on CUPS (Control and User Plane Separation). Tämän tekniikan ansiosta 5G voi keskittää CP (Control Plane) -tason toiminnot ja jakaa UP (User Plane) -tason toiminnot käyttäjien lähelle suorituskyvyn parantamiseksi. 5G-runkoverkon CP sisältää AMF:n (Access and Mobility Management Function) ja SMF:n (Session Management Function). UP sisältää UPF:n (User Plane Function). (Devopedia, 2021a)

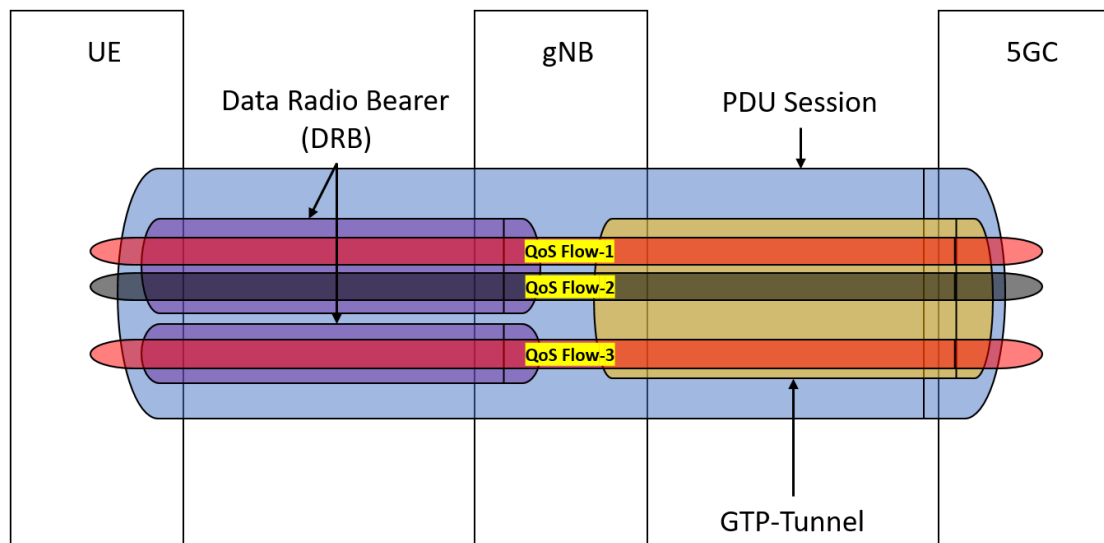
Kuva 4. 5GC 3GPP malli SBA:sta ja CP- ja UP-tason erottelu (Techplayon, 2020)



5G-järjestelmässä yksi verkon tärkeimmistä tehtävistä on tarjota käyttölaitteelle yhteys dataverkkoon (engl. Data Network), joka 5G ympäristössä on DNN (Data Network Name). DNN toimii samankaltaisesti kuin APN (Access Point Name) 4G:ssä. 5G NAS-SM (Non-Access Stratum Session Management) vastaa PDU (Protocol Data Unit) -istunnon määrittämisestä ja hallinnasta UP-tason yhteyksiä varten käyttölaitteen ja tietoverkkojen välillä. DNN voi olla esimerkiksi Internet, IMS tai mikä tahansa muu teollisuudelle tai tehtaalle omistettu DNN. (Techplayon, 2021a)

PDU-istunto on käyttölaitteen ja 5G-runkoverkon välinen linkki, joka sisältää käyttölaitteen ja gNB:n (g-NodeB) välille muodostetun DRB:n (Data Radio Bearer), gNB:n ja 5G-runkoverkon välille muodostetun GTP (GPRS Tunneling Protocol) -tunnelin ja käyttölaitteen ja 5G-runkoverkon välille muodostetun QoS (Quality of Service Flow) -palvelun (Kuva 5.)

Kuva 5. PDU-istunnon sisältö (Abbas, n.d.)



Verkon yhteydessä PDU:lla tarkoitetaan datayksikköä, joka siirretään verkkolaitteiden välillä osana protokollaa. Se koostuu otsikosta (engl. Header) ja hyötykuormasta, jossa otsikko sisältää tietoa PDU:sta, kuten sen tyyppistä ja kohteesta. Hyötykuorma sisältää varsinaisen lähetettävän tiedon. PDU:ta käytetään monissa eri protokollissa, mukaan lukien TCP/IP ja Ethernet, mahdollistamaan tiedonsiirto verkossa olevien laitteiden välillä.

5G-dataradiosiirtotie (engl. Data Radio Bearer) on suunniteltu käytettäväksi 5G-verkkojen kanssa. Radiosiirtotie on looginen kanava, jota käytetään tiedon siirtämiseen langattoman verkon kautta. GTP-tunnelointi on menetelmä verkkoliikenteen siirtämiseksi kahden verkkosolmun välillä. GTP:tä käytetään yleisesti matkapuhelinverkoissa tiedon siirtämiseen RAN:n (Radio Access Network) ja runkoverkon välillä, mikä mahdollistaa mobiililaitteiden pääsyn Internetiin ja muihin datapalveluihin. GTP-tunnelit tarjoavat turvallisen ja tehokkaan tavan siirtää tietoja verkon yli, ja niitä käytetään monissa nykyaikaisissa matkapuhelinverkoissa.

QoS-palvelu viittaa verkkoresurssien allokointiin erityyppisille tietoliikenteille, jotta varmistetaan, että kriittisin tietoliikenne toimitetaan laadukkaimmin. Toimituksen laatu voidaan saavuttaa useilla menetelmillä, kuten priorisoimalla tietyt tietoliikennetyypit muihin nähden varaamalla enemmän kaistanleveyttä kriittiselle tietoliikenteelle ja tarjoamalla redundantteja yhteyksiä, tavoitteena varmistaa toimituksen luotettavuus. QoS-palvelun

avulla 5G-verkot voivat tarjota käyttäjille korkealaatuista palvelua, vaikka verkko on raskaan kuormituksen alaisena. (Abbas, n.d.)

3.1.1 AMF

AMF (Access and Mobility Management Function) on uusi tekniikka 5G-runkoverkossa, jonka tehtävä on hoitaa matkaviestintäverkkojen yhteyden- ja liikkuvuudenhallintatehtävät. Se vastaanottaa kaikki yhteyden- ja istuntotiedot käyttölaitteelta ja välittää istunnonhallintaan liittyvät viestit SMF (Session Management Function) -toimintoon. GUAMI (Globally Unique AMF Identifier) -tunnistetta käytetään viestien reitittämiseen sopivaan AMF:ään. AMF toimii liityntäpisteenä (engl. Access Point) 5G-runkoverkkoon, mikä tarkoittaa, että se on vastuussa N1- tai N2-viitepinnalta lähtevän ohjaustason ja käyttölaitteiden tiedonsiirrosta. Yhteyden- ja liikkuvuudenhallintatehtävien käsittelyn lisäksi AMF hallitsee gNB:n välisiä solunvaihtoja. Solunvaihdossa aktiivinen viestintäistunto siirretään tukiasemalta toiselle istuntoa keskeyttämättä. AMF käyttää solunvaihdon aikana RRC (Radio Resource Control) -protokollaa signaalin laadun jatkuvaan mittaamiseen ja raportointiin. (Singh, 2023)

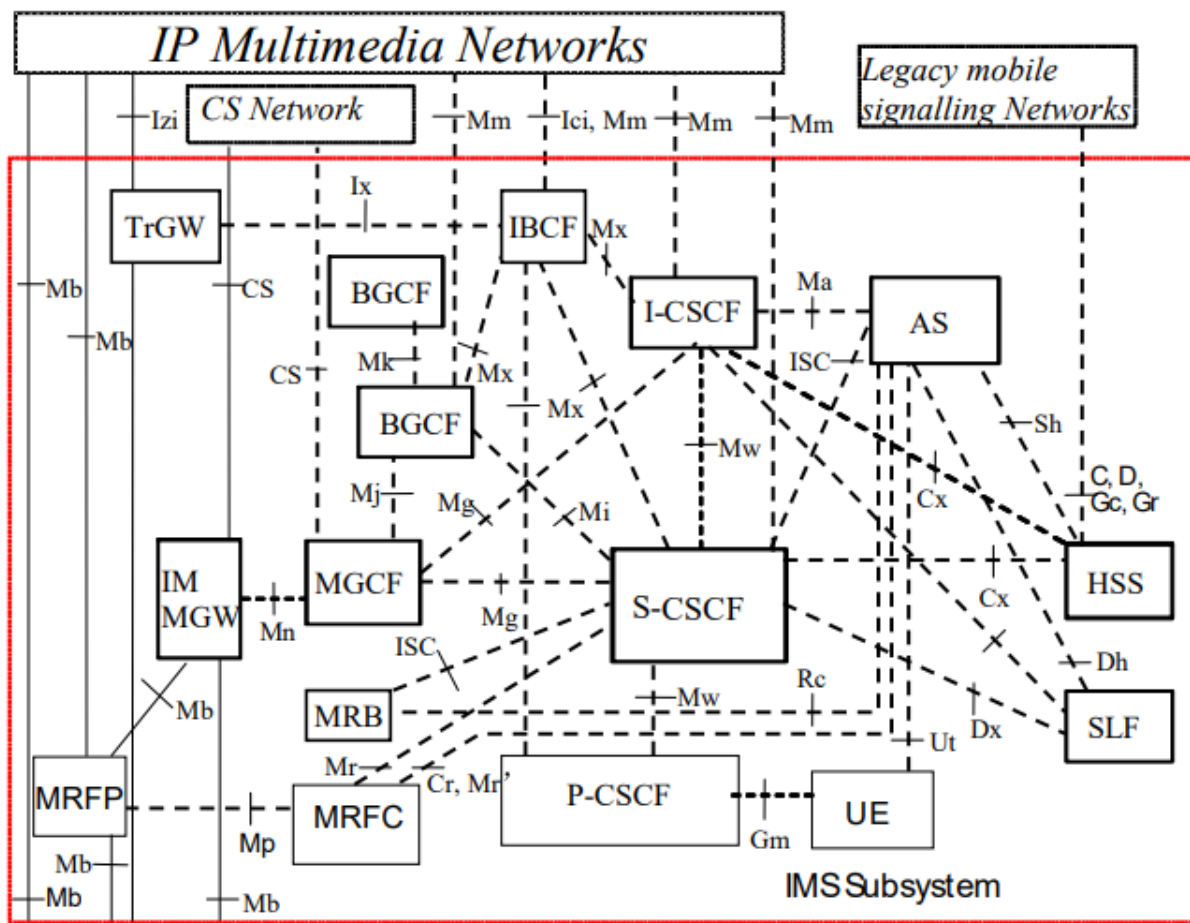
3.1.2 SMF

SMF:n (Session Management Function) rooli 5G-runkoverkossa on olennainen osa 5G SBA:ssa (Service-Based Architecture). SMF on vastuussa kaikkien istuntoon liittyvien tietojen käsittelystä, kuten PDU (Protocol Data Unit) -istuntojen asettamisesta, muokkaamisesta ja vapauttamisesta käyttölaitteen ja 5G-runkoverkon välillä. Tämä sisältää tarvittavien signaalointiviestien käsittelyn käyttölaitteen ja verkon välillä, sekä resurssien jakamisen ja hallinnan istuntoa varten. Yksi SMF:n tärkeistä tehtävistä on allokoida yksilöllisiä IP-osoitteita käyttölaitteille, ja varmistaa tarvittava tiedonsiirtopakettien reititys ja edelleenlähetys (engl. Forwarding). (Azar, n.d)

3.1.3 IMS-runkoverkko

IMS (IP-Multimedia Subsystem) on 3GPP:n (3rd Generation Partnership Program) määrittelemä arkkitehtuuri Internet-protokollalle rakennettujen viestintäpalvelujen toimittamiseksi. Puheviestintä on kehittynyt klassisesta piirikytkennäisestä pakettikytkentäiseen puheluun. IMS on avoin ja sillä on hyvin määritellyt hierarkkiset rakenteet, ja sen standardit määrittelevät multimediaviestintäpalvelujen tarjoamiseen vaadittavat runkoverkkotoiminnot. Siihen kuuluu erillisiä elementtejä, jotka hoitavat eri ominaisuuksien toimittamisen ja dokumentoivat tarkasti määritellyt viitelitännät kullekin komponentille. IMS:n avulla käyttäjät voivat estää lukkiutumisen ja valita parhaat komponentit toiminnallisille ominaisuuksille, samalla taaten niiden yhteen toimivuuden. Hierarkkista arkkitehtuuria hyödyntäen IMS-spesifikaatioissa määritellyt pitkälle hajautetut verkkotoiminnot erottavat selkeästi signaaloinnin ja mediapalvelut (Kuva 5).

Kuva 6. 3GPP referenssi arkkitehtuuri IMS-järjestelmästä (ETSI, 2014, s. 24).

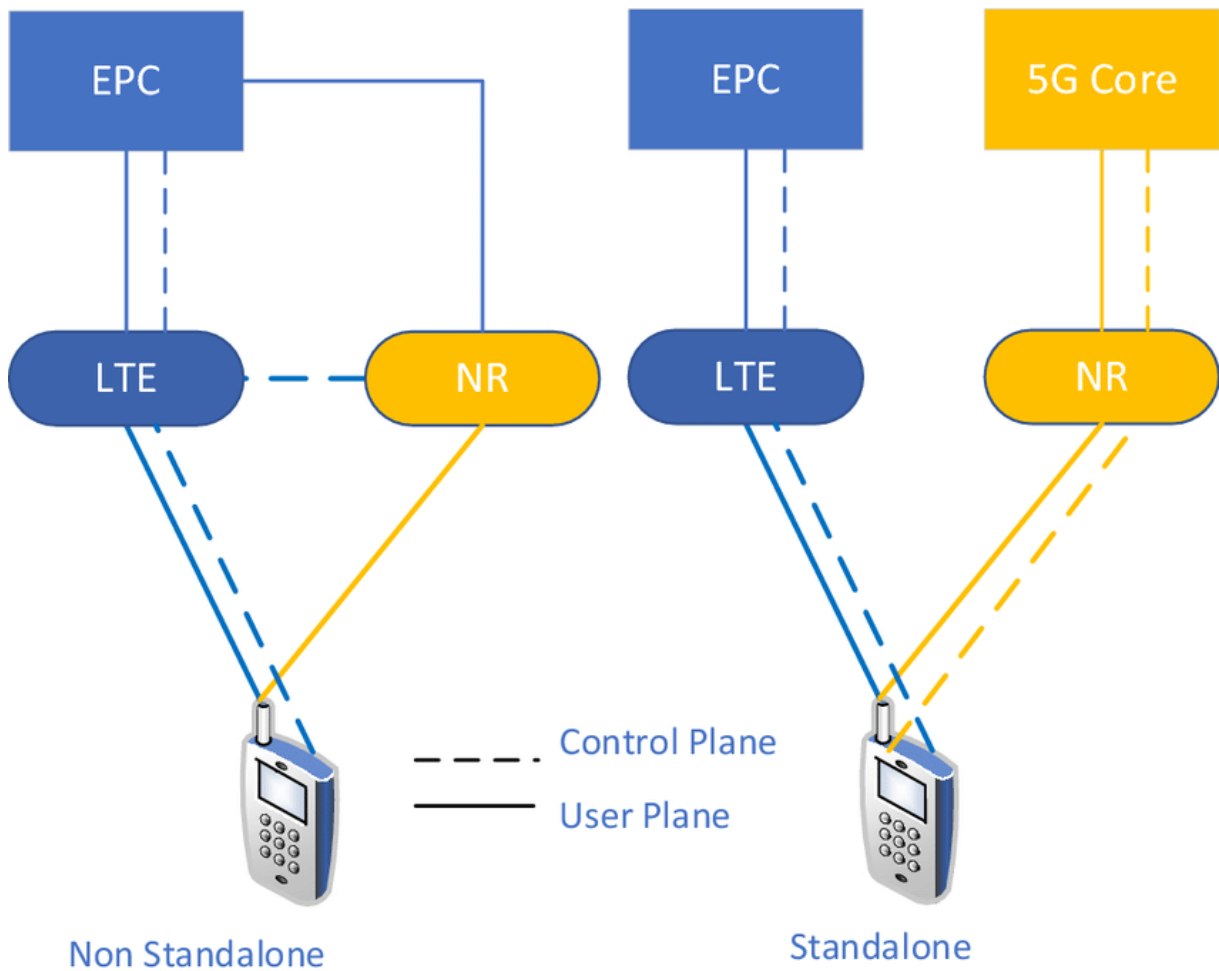


Runkoelementit ovat ensisijaisesti vastuussa SIP-liikenteen (Session Initiation Protocol) reitittämisestä, joka on valittuna signaalointimekanismina yleisissä viestintäverkkoinfrastruktuureissa. Verkkotoimintojen virtualisoinnin käyttöönotto ja avoimen yhteisövetoisen koodin, työkalujen ja kehysten lisääntyneet hyväksyntä globaalissa verkko-operaattoriyhteisössä ovat edistäneet IMS:n laajaa hyväksyntää. Näitä käyttöönottomenetelmiä noudattaen, palveluntarjoajat voivat hyödyntää IMS-pohjaisia runkoinfrastruktuureja tuottaakseen erittäin kustannustehokasta ja joustavaa puheääntä. (Metaswitch, n.d.)

3.2 SA ja NSA

5G SA (Standalone) on 5G-verkko, jonka toiminta ei ole riippuvainen edellisen sukupolven verkosta, eli 4G:stä (Kuva 7.). Se on täysin itsenäinen 5G-verkko, joka käyttää 5G NR (New Radio) -tekniikkaa sekä CP:lle (Control Plane), joka käsittelee signaalointia ja viestintää verkkoelementtien välillä, ja UP:lle (User Plane), joka kuljettaa käyttäjätietoja. Yksi 5G SA:n tärkeimmistä eduista on, että se mahdollistaa tehokkaamman taajuuksien käytön ja suuremman kapasiteetin verrattuna NSA (Non Standalone) 5G-verkkoihin, joiden CP:nä toimii 4G-verkko. SA-teknologia on erityisen sopiva käyttötapauksiin, jotka vaativat suurta nopeutta ja pientä latenssia, kuten virtuaalitodellisuus, lisätty todellisuus, yhdistetyt ajoneuvot ja teollisuusautomaatio. 5G SA tukee myös laajaa valikoimaa taajuuskaistoja, kuten alle 6GHz ja millimetriaalto, joka mahdollistaa erilaisten 5G-palvelujen käyttöönoton erilaisissa ympäristöissä ja skenaarioissa. SA verkot 5G:ssä on vielä käyttöönoton alkuvaiheessa eikä ole vielä laajalti saatavilla. Monet tällä hetkellä käytössä olevat 5G-verkot eivät ole itsenäisiä, joka tarkoittaa että niiden CP:nä toimii 4G-verkko. 5G-teknologian kehittyessä ja kypsyessä on kuitenkin odotettavissa, että yhä useampia 5G-verkkoja otetaan käyttöön erillisinä verkkoina. (Darah, 2022)

Kuva 7. SA- ja NSA-verkon CP- ja UP-tason reitit runkoverkkoon (Kollar, 2019)



Kuten kuvasta 7 voi nähdä, 5G NSA on toisenlainen 5G-verkko, jonka toiminta perustuu edellisen sukupolven, eli 4G:n verkkoon. NSA-verkossa signaalointia ja verkkoelementtien välistä CP-tason viestintää tarjoaa 4G-verkko, kun taas käyttäjätietoja kuljettava UP-taso käyttää 5G NR-tekniikkaa. 5G NSA-tekniikan etuna on, että se mahdollistaa sujuvan siirtymisen 4G:stä 5G:hen, sillä sen avulla operaattorit voivat hyödyntää jo olemassa olevaa 4G-infrastruktuuria ja ottaa asteittain käyttöön 5G-ominaisuuksia. 5G-NSA:n käyttö voi olla erityisen hyödyllistä alueilla, joissa täysimittainen 5G SA-verkko ei ehkä vielä ole mahdollista teknisten tai taloudellisten rajoitteiden vuoksi. CP:n riippuvuus 4G-verkosta tarkoittaa kuitenkin sitä, että 5G NSA-verkot eivät välttämättä ole yhtä tehokkaita kuin SA-verkot kapasiteetin ja latenssin suhteen. Ne voivat olla myös rajoitettuja taajuuskaistojen ja palvelujen osalta, joita ne voivat tukea. (Darah, 2022)

4 VoNR

Voice over New Radio eli VoNR on viestintäteknikka, joka käyttää VoIP (Voice over IP) -ääntä välittääkseen ääntä IP (Internet Protocol) -protokollan avulla matkapuhelinverkon yli.

Joitakin VoNRin käytön etuja ovat lisääntynyt liikkuvuus, paremmat yhteydet, alhaisemmat kustannukset ja parempi äänenlaatu. Koska VoNR käyttää IP-verkkoja, sen avulla käyttäjät voivat kommunikoida mistä tahansa Internet-yhteyden kautta, mikä voi olla erityisen hyödyllistä etäryhmille tai usein liikkeellä olevalle käyttäjälle. Lisäksi VoNR voidaan integroida muihin viestintä- ja yhteisötyökaluihin, kuten pikaviestintään ja videoneuvotteluihin, kokonaisvaltaisemman ratkaisun tarjoamiseksi ryhmille. VoNR voi olla myös organisaatioille kustannustehokkaampaa, erityisesti kauko- tai ulkomaanpuheluissa. VoNR voi tarjota paremman äänenlaadun kuin perinteinen radio, koska se ei koske samoja radiotaajuisen lähetyksen rajoituksia. (RF Wireless World, n.d.)

Kuten VoNRin edeltäjä, VoLTEa (Voice over Long-Term Evolution) käytetään puhepalvelujen tarjoamiseen, tärkein ero näiden kahden tekniikan välillä on verkon tyyppi, jossa niitä käytetään. VoNR on käytössä 5G-verkoissa, kun taas VoLTEa käytetään 4G LTE-verkoissa. Koska 5G SA-verkot ovat nopeampia ja tehokkaampia kuin 4G-verkot, VoNR voi tarjota paremman äänenlaadun ja nopeammat puhelunmuodostusajat VoLTEen verrattuna. VoNR mahdollistaa kehittyneempien ominaisuuksien ja palveluiden, kuten teräväpiirtoäänen sekä samanaikaisen puhe- ja tiedonsiirron käytön. Molemmat ovat tärkeitä teknologioita puhepalvelujen tarjoamisessa matkapuhelinverkoissa, mutta VoNR tarjoaa joitain etuja VoLTEen verrattuna 5G-verkkojen ominaisuuksien ansiosta (Sharetechnote, n.d.).

VoNR ja VoLTE perustuvat äänipuheluun IMS:n yli. IMS on kehys Internet-protokollan multimediaspalveluiden toistamiseen. Se on runkoverkkoarkkitehtuuri, jonka avulla palveluntarjoajat voivat tarjota asiakkailleen erilaisia IP-pohjaisia palveluita. IMS käyttää IP-protokollien ja signaalointitekniikoiden yhdistelmää ohjatakseen multimediaspalvelujen toimittamista verkon kautta. Näin palveluntarjoajat voivat tarjota yhtenäisen käyttökokemuksen eri laitteissa ja verkoissa. IMS:n avulla palveluntarjoajat voivat helposti lisätä uusia palveluita ja sovelluksia verkkoihinsa. (Jain, 2022)

Istunnon aloitusprotokolla (engl. Session Initiation Protocol) eli SIP on signaalointiprotokolla, jota käytetään sellaisten reaaliaikaisten istuntojen aloittamiseen, ylläpitoon, muokkaamiseen

ja lopettamiseen, jotka sisältävät video-, ääni- ja viestintäsovelluksia ja -palveluita kahden tai useamman päätepisteen välillä Internetissä. SIP:iä käytetään multimediaistuntojen, kuten ääni- ja videopuheluiden perustamiseen ja hallintaan eri laitteiden välillä. SIP on suunniteltu riippumattomaksi taustalla olevasta siirtoprotokollasta, joten se voi toimia useiden siirtoprotokollien kanssa, mukaan lukien UDP (User Datagram Protocol), TCP (Transmission Control Protocol) ja SCTP (Stream Control Transmission Protocol). Se on sovellustason protokolla, jota voidaan käyttää IP-verkoissa, kuten Internetissä, mahdollistamaan multimediatelevisiointia käyttäjien välillä. (Kumar, 2020)

5 Tukiasema

Tukiasemaan kuuluu laitteisto, jota käytetään langattomassa tietoliikenneverkossa. Se tarjoaa rajapinnan verkon tilaajien käyttämien mobiililaitteiden välillä. Tukiasema sisältää useita radiolähetinvastaanottimia, joita käytetään viestimään mobiililaitteiden kanssa, sekä muita laitteita, kuten antennia ja signaalinkäsittelylaitteistoa. Tukiasema sijaitsee usein kiinteässä paikassa, kuten rakennuksen huipulla tai tornissa, ja sitä käytetään tarjoamaan peitto tietyille maantieteelliselle alueelle.

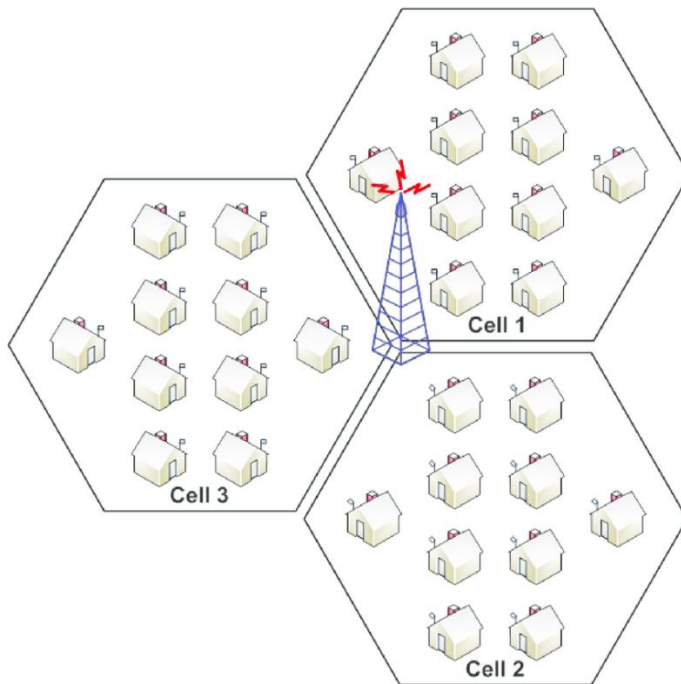
Kantataajuusyksikkö on tukiaseman osa, joka koostuu kahdesta erilaisesta moduulista: järjestelmäyksiköstä ja kapasiteettiyksiköstä. Tukiaseman järjestelmäyksikkö on tietokone, joka ohjaa tukiaseman toimintaa ja hallitsee sen lähettämää ja vastaanottamaa dataa. Järjestelmäyksikkö yhteydessä transport-verkkoon. Kapasiteettiyksikkö on laite, joka vastaa signaalien käsittelystä, joita käytetään tiedon siirtämiseen verkon ja siihen kytkettyjen mobiililaitteiden välillä. (Techopedia, 2019a)

Kapasiteettiyksikkö on vastuussa kantataajuussignaalien virhekorjauksen suorittamisesta, moduloinnista ja demoduloinnista. Kapasiteettiyksikkö on kytketty radioon, joka on vastuussa radiotaajuisten signaalien käsittelystä, joita käytetään tiedon lähettämiseen ja vastaanottamiseen ilmassa. Matkapuhelinverkossa kapasiteettiyksikkö on tukiaseman kriittinen komponentti, koska se vastaa laitteiden välisestä viestinnän hallinnasta. Se vastaa myös toimintojen suorittamisesta, kuten kanavanvaihdosta, jossa mobiililaitte siirretään solusta toiseen sen liikkuesssa verkon läpi.

Radiolaitteet ja kantataajuusyksikkö yhdistetään korkealaatuisilla valokuitukaapeleilla. Kaapelityyppejä on erilaisia, mutta NR FDD -radioissa yleinen käytetty valokuitukaapeli on CPRI (Common Public Radio Interface). CPRI on tekninen standardi, jota käytetään digitaalisen radiotaajuisten signaalien lähettämiseen radiolaitteen ja tietoliikennejärjestelmän kantataajuisen prosessointilaitteen välillä. CPRI:tä käytetään yleisesti solukoverkoissa RF (Radio Frequency) -signaalien lähettämiseen tukiaseman radiolaitteista kantataajuuskäsittelylaitteistoon. CPRI on nopea, matalan latenssin liitäntä, jolla on tärkeä osa nykyaikaisissa tietoliikennejärjestelmissä korkealaatuisten viestintäpalvelujen mahdollistamisessa. (Telecomkhabar, 2019)

Solu on matkapuhelinverkon kattama maantieteellinen perusalue (Kuva 8). Jokaista solua palvelee lähellä oleva antenni tai torni, joka on yhteydessä matkapuhelinverkkoon ja mahdollistaa solun sisällä olevien puhelinten kommunikoinnin verkon kanssa. Solujen koko ja muoto vaihtelevat käytetyn tekniikan ja niiden peittämän maaston mukaan, mutta ne ovat pieniä alueita, jotka kattavat muutaman neliökilometrin.

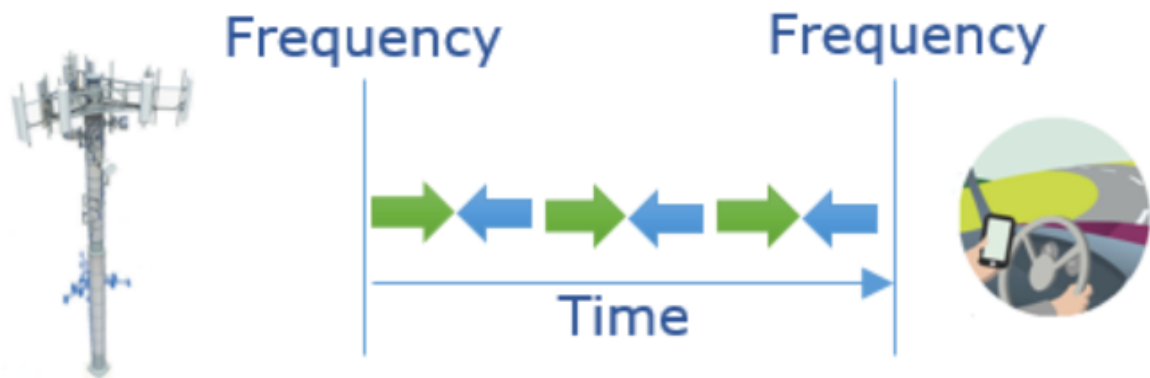
Kuva 8. Esimerkki tukiaseman soluista (Fatseas, 2011)



5G tukiasemat tukevat eri dupleksointimenetelmiä. Dupleksoinnilla tarkoitetaan viestintäjärjestelmää, joka voi lähettää ja vastaanottaa tietoja samanaikaisesti. Dupleksointi mahdollistaa kaksisuuntaisen viestinnän ilman, että toisen osapuolen tarvitsee odottaa, että toinen lopettaa lähetyksen ennen kuin he voivat vastata. Dupleksointia käytetään puhelinjärjestelmissä, joiden avulla esimerkiksi kaksi ihmistä voivat puhua toisilleen reaaliajassa, ja verkkojärjestelmissä, joissa useat laitteet voivat olla yhteydessä toisiinsa samanaikaisesti (Loshin, 2021). TDD (Time Division Duplexing) ja FDD (Frequency Division Duplexing) ovat kaksi erilaista tapaa viestinnän mahdollistamiseksi molempiin suuntiin viestintäkanavalla.

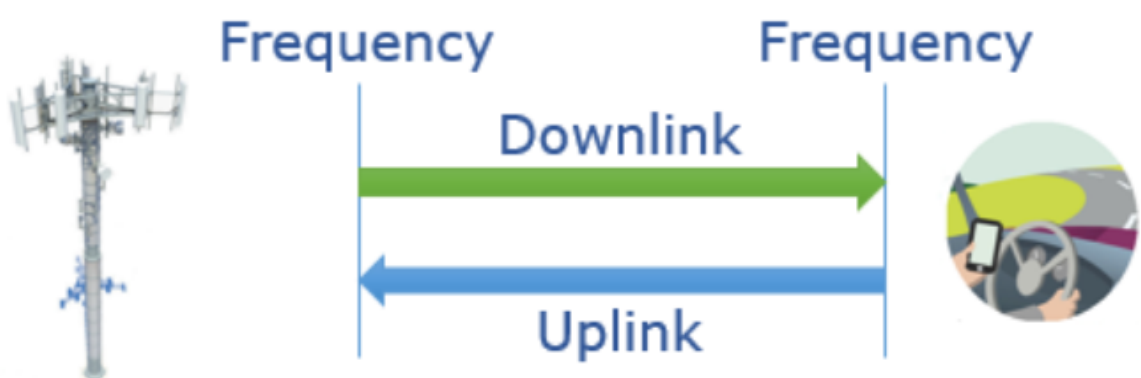
TDD-dupleksoinnissa käytetään samaa taajuutta sekä lähetykseen että vastaanottoon, mutta molemmat suunnat ovat ajallisesti erotettuja (Kuva 9). TDD tarkoittaa, että lähetin ja vastaanotin vuorotellen lähettävät ja vastaanottavat dataa, ja jokainen lähetyssuunta tapahtuu tietyissä aikaväleissä. TDD:tä käyttää muitakin langattomat viestintäjärjestelmät, kuten Wi-Fi ja Bluetooth, joissa sen avulla useat laitteet voivat kommunikoida ilman häiriötä.

Kuva 9. TDD havainnollistettuna (Sharetechnote, n.d.a)



FDD-dupleksointi on toinen viestintämenetelmä, jonka avulla laite voi kommunikoida yhdellä kanavalla jakamalla signaalin eri taajuuskaistoihin lähetystä ja vastaanottoa varten. FDD mahdollistaa full-duplex-viestinnän, jossa laitteet voivat sekä lähettää ja vastaanottaa dataa samanaikaisesti ilman häiriöitä. Matkaviestinnässä FDD:tä käytetään yleisesti matkapuhelinverkoissa, joissa sitä käytetään eri taajuuskaistojen osoittamiseen eri käyttäjille. Näin useat laitteet voivat kommunikoida samanaikaisesti ilman häiriöitä. FDD:ssä lähetävä ja vastaanottava kaista erotellaan suojakaistalla häiriön välttämiseksi (Simbase, 2022).

Kuva 10. FDD havainnollistettuna (Sharetechnote, n.d.a)



Sekä TDD- että FDD-dupleksointimenetelmillä on omat hyötynsä ja haittansa, ja käytettävän vaihtoehdon valinta riippuu viestintäjärjestelmän erityisvaatimuksista.

5.1 Parametrisointi

Parametrisointi tarkoittaa prosessia, jossa määritellään parametrien arvot mallissa tai järjestelmässä. Parametrit sisältävät muuttujia, joita voidaan säätää tai virittää, jotta malli sopii paremmin tiettyyn tietojoukkoon tavoitteena optimoida järjestelmän suorituskyky. Tässä opinnäytetyössä muokataan kolmen eri 5G tukiaseman konfiguraatitiedostoja, jotta VoNR-ominaisuus voidaan aktivoida testiympäristössä.

Parametrisointia käytetään usein tekemään koodista joustavampi ja uudelleenkäytettävämpi. Ohjelmistotestauksessa parametrisointia käytetään testaamaan samaa koodia eri tuloilla. Jotkut tukiaseman parametrit ovat muokattavissa manuaalisesti, kun taas jotkut parametrit järjestelmä hakee automaattisesti. Järjestelmän parametrisointi on tehokas työkalu, jota voidaan käyttää mukauttamaan järjestelmän käyttäytymistä ja optimoimaan sen suorituskykyä monenlaisia tehtäviä ja sovelluksia varten.

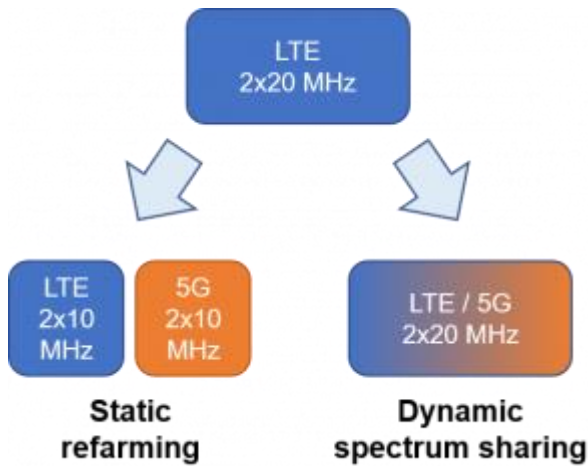
5.2 Ominaisuuksien aktivointi

Ominaisuuksia aktivoidaan muokkaamalla tukiaseman parametrisointia. Yksi 5G:n tärkeimmistä ominaisuuksista on kyky tukea paljon suurempaa määrää laitteita kehittyneillä verkkotekniikoilla. 5G-verkot on suunniteltu erittäin joustaviksi ja muokattavissa oleviksi, jolloin palveluntarjoajat voivat räätälöidä verkkonsa asiakkaidensa erityistarpeiden mukaan.

Esimerkkinä aktivoitavasta ominaisuudesta on DSS (Dynamic Spectrum Sharing). DSS on tekniikka, jonka avulla 5G jakaa saman taajuuskaistan resurssit dynaamisesti 4G:n kanssa (Kuva 11). Tästä ominaisuudesta on operaattoreille hyötyä 5G-verkkojen käyttöönotossa, sillä sen avulla operaattorit voivat käyttää olemassa olevia taajuusresursseja tehokkaammin. 5G-verkossa DSS-tekniikan avulla operaattorit voivat dynaamisesti allokoida spektriresursseja kunkin palvelun tarpeen mukaan. Esimerkiksi suuren kysynnän aikoina enemmän kaistanleveyttä voidaan varata tukemaan suuren kaistanleveyden sovelluksia, kuten videon suoratoistoa tai online-pelaamista, kun taas alhaisen kysynnän aikoina voidaan tarvita vähemmän kaistanleveyttä alhaisen kaistanleveyden sovellusten, kuten sähköpostin tukemiseen tai nettiselailuun. DSS voi auttaa 5G-verkkoja olemaan joustavampia ja

mukautuvaisempia, jolloin ne voivat tukea laajempaa palveluiden ja sovellusten valikoimaa ja maksimoida käytettävissä olevien taajuusresurssien käyttöä.

Kuva 11. Dynaaminen spektrin jakaminen 4G:n ja 5G:n välillä (Viola, 2020)



6 Käyttölaitteet

Testauksessa käytettävät laitteet ovat usein kaupalliseen käyttöön tarkoitettuja, ja tätä opinnäytetyötä varten tilattiin kaksi Nokia XR20 -puhelinta. Kaikki laitteet eivät kuitenkaan aina suoriltaan ole soveltuvia kenttätestaamiseen, vaan tarvitsevat toimiakseen R&D-ohjelmiston (Research and Development) myyjältä. R&D-ohjelmisto antaa mahdollisuuden konfiguroida käyttölaite tiettyyn testiympäristöön soveltuvaksi muokkaamalla laitteen NV (Non-Volatile) -kohteita. Kaupalliseen käyttöön tarkoitettussa puhelimesta ei saa diagnosointi porttia auki. Diagnosointi portin täytyy olla auki, jotta kolmannen osapuolen ohjelmistolla kerättävät mittaustiedot voidaan kerätä.

Tässä opinnäytetyössä testiympäristönä käytettiin NR FDD tukiasemia, jotka toimivat n1 kaistalla. Taajuuskaista n1:n keskitaajuus on 2100MHz, ja sen UL-keskikaista on 1920–1980 MHz ja DL-keskikaista on 2110 – 2170MHz (5G-tools, 2020), joten käyttölaitteet täytyi konfiguroida tätä ajatellen. Vakioasetuksilla UE pystyy muodostamaan yhteyden kaikille kaistoille, jota laitteen antennit tukevat.

6.1 SIM-kortti

Testauksessa käytettäviin tukiasemiin konfiguroidaan myös, mitä SIM-kortin MNC:tä (Mobile Network Code) ja MCC:tä (Mobile Country Code) käytetään. Traficom on myöntänyt Nokian testikäyttöön MNC:t 07, 08 ja 09 (Traficom, 2020). Näitä eri MNC:tä hyödyntämällä voi suunnitella päällekkäisiä testauksia häiritsemättä muiden ryhmien testausta. Jokaisella MNC:llä on oma rekisteröintipolkunsa riippuen, onko käyttölaite konfiguroitu toimimaan SA tai NSA tilassa. MNC on koodi, jota käytetään yhdessä MCC:n kanssa matkapuhelinverkko-operaattorin yksilöimiseen. MNC on kaksi- tai kolminumeroinen koodi, jota käytetään tietyn matkaviestinverkko-operaattorin tunnistamiseen. Näitä käytetään yhdessä sijaintialuekoodin (engl. Location Area Code) ja solutunnuksen kanssa matkapuhelimen sijainnin tunnistamiseen. Matkapuhelinverkko käyttää niitä reitittämään puhelut ja viestit oikeaan solutorniin ja lopulta oikeaan mobiililaitteeseen. MCC ja MNC ovat IMSI:n (International Mobile Subscriber Identity) ensimmäiset numerot, esimerkkinä DNA Oyj:n teoreettisesta IMSI:stä 244030000000000, jossa ensimmäiset kolme numeroa ovat Suomen MCC-tunnus ja kaksi seuraavaa numeroa ovat DNA:lle myönnetty MNC, ja loppuosa on tunnusnumero.

IMSI on yksilöllinen tunnistenumero, joka annetaan jokaiselle matkapuhelintilaajalle. Sitä käytetään matkapuhelinverkon tilaajan tunnistamiseen ja se tallennetaan matkapuhelimeen asetettuun SIM-korttiin. MNC:n ja MCC:n lisäksi IMSI koostuu matkapuhelinliittymän tunnusnumerosta. MNC, MCC ja tunnusnumero tunnistavat matkapuhelinverkko-operaattorin ja tunnusnumero identifioi tilaajan tässä verkossa. IMSI:ä käytetään yhdessä TMSI:n (Temporary Mobile Subscriber Identity) kanssa matkapuhelimen tunnistamiseen verkossa. TMSI on väliaikainen tunnusnumero, joka määrittää matkapuhelimelle, kun se muodostaa yhteyden verkkoon. Sitä käytetään suojelemaan tilaajan yksityisyyttä, koska TMSI:tä muutetaan ajoittain seurannan estämiseksi (RF Wireless World, n.d.a). IMSI:ä käytetään TMSI:n etsimiseen tietokannasta puheluiden ja viestin reitittämiseksi oikeaan matkapuhelimeen.

6.2 Konfigurointi testiympäristöön

Laitteen konfigurointi tiettyä testiympäristöä varten vaativat testauksen tavoitteen mukaan omat toimenpiteensä. Puhelimen kyvykkyyttä tiettyjen teknologioiden kannalta täytyy

muuttaa tai rajoittaa. Testiympäristö, johon tämän opinnäytetyö sijoittuu, käyttää vain yhtä taajuuskaistaa, joten puhelimet pakotetaan tukemaan vain tätä kaistaa. Koska VoNRin vaatimus on, että signaloinnin täytyy tapahtua 5G-runkoverkon kautta, puhelin pakotetaan toimimaan SA-tilassa. Testiympäristössä käytettävät puhelimet sisältävät Qualcommin piirisarjan, joten niiden konfigurointiin tarkoitettulla erikoistuneella ohjelmistolla muokataan puhelimen NV-kohteita.

Qualcommin teknologioiden ja laitteiden yhteydessä NV-kohteet viittaavat tietoihin, jotka on tallennettu laitteen pysyvämuiistiin. Pysyvämuiisti on muistityyppi, joka säilyttää tiedot, vaikka virta katkaistaan. NV-kohteet voivat sisältää erityyppisiä tietoja, kuten laitekohtaisia kokoonpanoasetuksia, kalibrointitietoja ja muun tyyppisiä tietoja, jotka on säilytettävä, vaikka laitteen virta on katkaistu. Qualcomm-laitteissa NV-kohteet tallennetaan erityiselle pysyvämuiistin alueelle, ja niitä voidaan käyttää ja muokata tietyillä työkaluilla, kuten QXDM:llä (Qualcomm eXtensible Diagnostic Monitor). NV-kohteita käytetään Qualcomm-laitteissa tärkeiden tietojen tallentamiseen ja hakemiseen, joita laitteen laiteohjelmisto ja ohjelmisto käyttävät virtajaksojen ajan.

QXDM on Qualcommin kehittämä diagnostiikkatyökalu käytettäväksi sen piirisarjojen ja laitteiden kanssa (Qualcomm, 2020a, ss. 1-2). Sitä käytetään ensisijaisesti virheenkorojaukseen ja langattomien viestintäjärjestelmien ja laitteiden, kuten matkapuhelimien, modeemien ja muiden Qualcomm-piirisarjoja käyttävien laitteiden testaukseen. QXDM:n avulla voidaan seurata ja analysoida laitteen toiminnan eri näkökohtia, kuten radiotaajuuksien suorituskykyä, protokollapinon käyttäytymistä sekä laitteisto- ja ohjelmistokomponenttien suorituskykyä.

7 Kenttätestaus

Kenttätestauksen tarkoituksena on testata tukiasemia ja niiden suorituskykyä testiympäristössä, jotka vastaavat operaattoreiden kaupallisia RAN (Radio Access Network) -verkkoja. Testauksen tavoitteen mukaan, käytössä voi olla muuttuva määrä eri käyttölaitteita tai tukiasemia.

Yksi tärkeä tutkimusmenetelmä kenttätestauksessa on toistettavuus. Toistettavuuden käsite viittaa kykyyn saada samat tulokset kokeesta tai tutkimuksesta, kun se toistetaan samoissa olosuhteissa. Jotta koetta tai tutkimusta pidettäisiin toistettavana, se on suunniteltava ja suoritettava tavalla, joka minimoi ulkopuolisten tekijöiden vaikutuksen ja antaa muille tutkijoille mahdollisuuden helposti toistaa menetelmä ja saada samat tulokset.

Toistettavuuden saavuttamiseksi on noudatettava tiettyjä ehtoja (Joint Committee for Guides in Metrology, 2010, s. 35):

- Menettelytapa, mittaukset suoritetaan noudattaen tarkkoja ennalta määritettyjä menetelmiä
- Paikka, käyttölaitteen sijainti testin aikana voi vaikuttaa tuloksiin
- Käyttölaitteet, optimaalisen vertailukelpoisuuden takaamiseksi samoja käyttölaitteita tulisi käyttää saman ympäristön testauksessa.
- Reitti, kiinteä reitin aloitus- ja lopetuspaikka
- Toisto, sama testi suoritetaan useaan kertaan mahdollisten virhemarginaalien ja keskiarvon löytämiseksi

Järjestelmätasolla kenttätestaus on prosessi, jolla varmistetaan tuotteen tai laitteen suorituskyky ja toimivuus kentällä, eli operaattorin verkkoa vastaavassa ympäristössä, jossa sitä käytetään. Testaus suoritetaan järjestelmän asennuksen ja käyttöönoton jälkeen, tarkoituksena varmistaa vaadittavien suorituskykystandardien toiminta. Myös mahdolliset ongelmat ja vianmääritykset voidaan tunnistaa kenttätestauksen aikana. Kenttätestauksen aikana kerätään tietoa tuotteen tai järjestelmän suorituskyvystä. Tätä kutsutaan verifiointiksi. Verifiointin tarkoituksena on selvittää, toimiiiko tuote optimoidulla ja suunnitellulla tavalla operaattorin vastaavassa kenttäympäristössä. Näin saadaan mahdollisimman todenmukainen kuva tuotteen toimivuudesta.

Yksi kenttätestaukseen voimakkaasti vaikuttava asia on olosuhteet, kuten sää, liikenne tai ulkopuolinen häiriö. Osaa näiden muuttujien tekemää vaikutusta voidaan lieventää analysoinnin aikana lajittelemalla kerätyt tulokset esimerkiksi ajan tai mittapisteen etäisyyden suhteen.

7.1 Työkalut

Käyttölaitteesta kerättävät mittatiedot, eli lokit kerätään Nemo Outdoor -ohjelmistolla, jonka on kehittänyt ja markkinoinut Keysight Technologies, joka on testaus- ja mittaustaitteiden ja -ohjelmistojen toimittaja. Ohjelmisto on suunniteltu auttamaan insinöörejä ja verkkoarkkitehtejä suunnittelemaan, optimoimaan ja varmistamaan langattomien verkkojen suorituskyky eri ympäristöissä. Sitä voidaan käyttää erityyppisten langattomien verkkojen, kuten matkapuhelinverkkojen, Wi-Fi- ja satelliittiverkkojen kattavuuden ja kapasiteetin mallintamiseen ja simulointiin. Nemo Outdoor -ohjelmistolla voidaan optimoida verkkoinfrastruktuurin, kuten tukiasemien ja antennien käyttöönottoa, sekä ennustaa verkon suorituskykyä erilaisissa olosuhteissa ja skenaarioissa. Suunnittelu- ja optimointimahdollisuuksiensa lisäksi Nemo Outdoor sisältää valikoiman työkaluja, joilla käyttäjät voivat mitata ja analysoida keskeisiä suorituskykyindikaattoreita, kuten signaalin voimakkuutta, tiedonsiirtonopeutta ja latenssia. Suorituskykyindikaattorit auttavat testaajaa tekemään vianmäärittäyksiä ja optimoimaan verkon suorituskykyä. (Keysight, n.d.)

Nemo Outdoorilla kerättyjen lokitietojen analysointia varten käytetään toista Keysightin ohjelmistoa, Nemo Analyzeä. Nemo Analyze on työpöytäsovellus Nemo-tuotteilla kerätyn datan analysointiin. Tällä voi suorittaa jälkianalyysin, vianetsinnän ja tilastollisen raportoinnin. Analyzellä voi hahmottaa kerätyn datan monella eri tavalla, esimerkiksi kuvaajilla, ruudukoilla, numeraalisena datana tai tekstimuodossa. Sovelluksen sisältä voi myös viedä datan muihin sovelluksiin. (Keysight, n.d.a)

Tässä opinnäytetyössä ja Nokialla on käytössä monia sisäisiä työkaluja ja ohjelmistoja, joita ei tässä työssä voi tarkemmin käydä läpi.

7.2 Tulosten analysointi

Tulosten analysointi on tärkeää, koska sen avulla voidaan ymmärtää ja tulkita kerättyä tietoa. Analysointiprosessi auttaa tunnistamaan datassa olevia malleja, trendejä ja suhteita, mikä voi johtaa oivalluksiin ja ymmärrykseen tutkittavasta aiheesta. Ilman tulosten analysointia olisi vaikea tietää, täyttääkö verkko halutut suorituskykystandardit. Vertaamalla tuloksia esimerkiksi samassa ympäristössä tehtyihin tuloksiin, voidaan määrittää, onko verkon suorituskyky parantunut, joka on ratkaisevia tekijöitä 5G-verkkojen käyttöönoton ja optimoinnin kannalta.

Luodaan hypoteettinen tilanne, kenttätestauksen tavoitteena on verrata uuden tukiasemaohjelmiston suorituskykyä aikaisempaan versioon. Tuloksia analysoidessa kenttätestaaja huomaa suurta vaihtelua suorituskyvyssä. On tärkeää tarkistaa, olivatko radio-olosuhteet samanlaiset testin aikana, koska vaihtelut voivat vaikuttaa testin tuloksiin. Esimerkiksi jos radio-olosuhteet ovat paremmat yhden testin aikana kuin toisessa, testin tulokset eivät välttämättä ole vertailukelpoisia. Tässä tilanteessa olisi vaikea määrittää, johtuvatko suorituskyvyn muutokset verkosta tai radio-olosuhteista. Siksi vertaamalla kunkin testin radio-olosuhteita, voidaan varmistaa tulosten vertailukelpoisuus, ja suorituskyvyssä tapahtuneet muutokset ovat johtuneet ohjelmistossa tapahtuneista muutoksista.

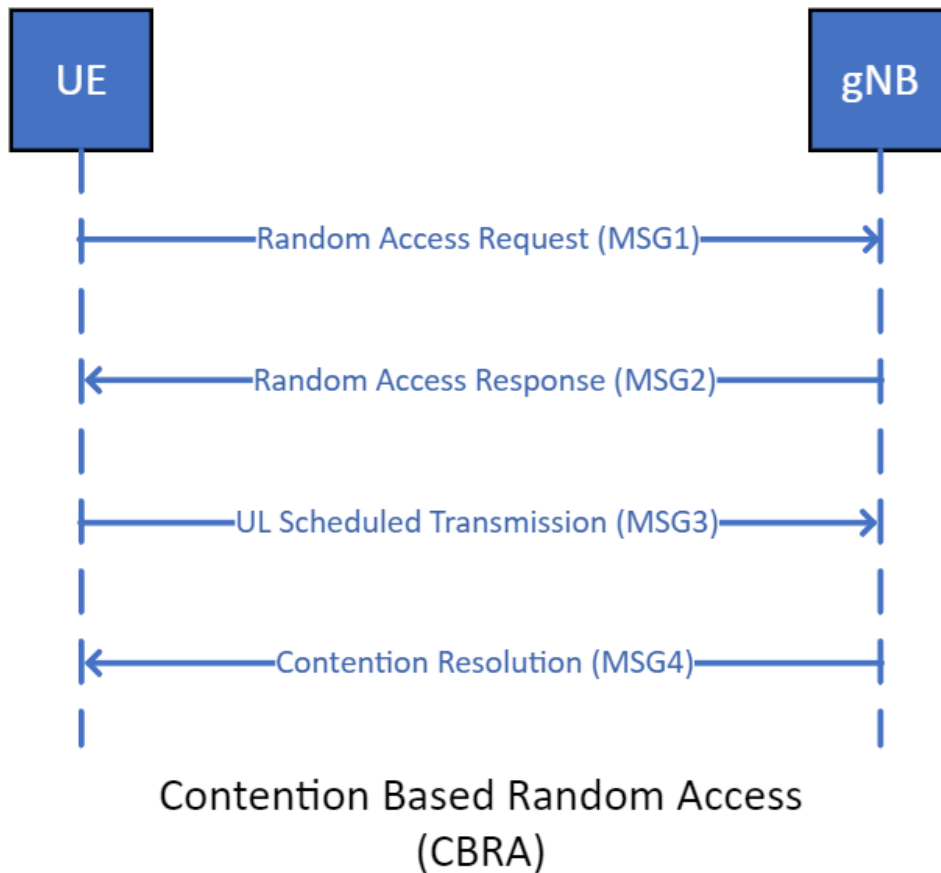
8 KPI

KPI:t (Key Performance Indicator) ovat tärkeitä mittareita, jotka auttavat organisaatioita mittaamaan ja seuraamaan järjestelmiensä ja prosessiensa suorituskykyä (Cisco, n.d.). 5G:n yhteydessä KPI:t ovat erityisen tärkeitä 5G-verkkojen, -palveluiden ja –sovellusten suorituskyvyn ja tehokkuuden seurannassa. Esimerkkejä 5G:n KPI-mittareista ovat verkon nopeuteen, kapasiteettiin ja luotettavuuteen liittyvät laskurit ja funktiot. Seuraamalla ja analysoimalla näitä KPI:tä säännöllisesti organisaatiot voivat tunnistaa kehittämiskohteita 5G-järjestelmiensä ja -palveluidensa optimoimiseksi. Analysointi voi auttaa varmistamaan, että 5G-verkot tarjoavat käyttäjille parhaan mahdollisen käyttökokemuksen ja vastaavat yrityksen tai organisaation tarpeisiin. KPI:t ovat numeerisia laskureita, joiden arvot kasvavat tiettyjen tapahtumien jälkeen. Näitä laskureita hyödyntäen voidaan luoda funktioita, jotka kertovat verkon suorituskyvystä.

8.1 Saavutettavuus

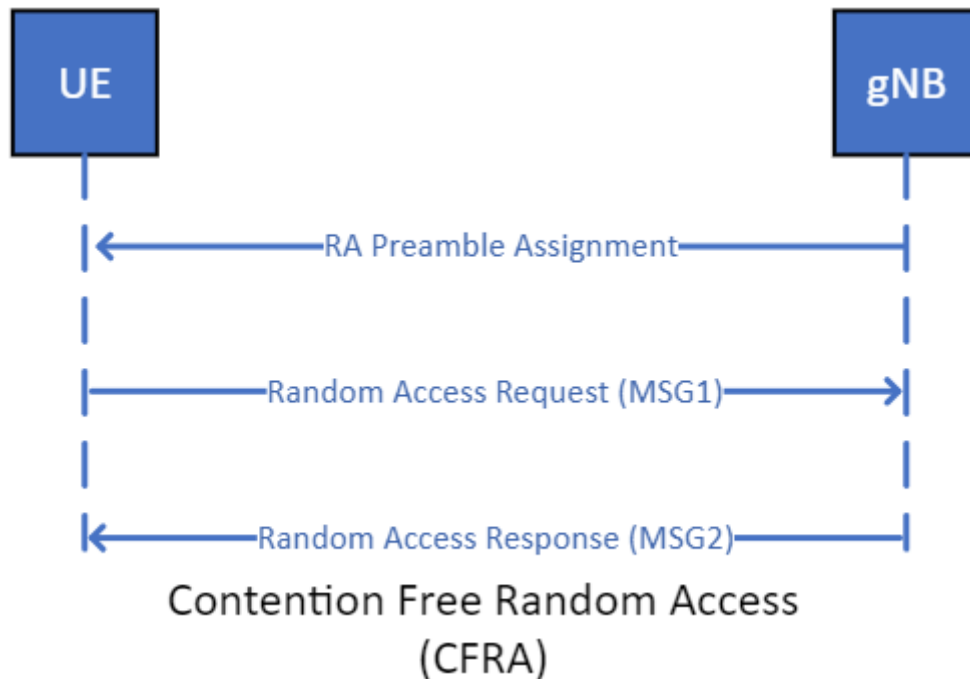
Saavutettavuus (engl. Accessibility) on KPI osa-alue, jossa tutkitaan solun saatavuutta, puhelun muodostamista ja käyttäjien määrää. Kun käyttölaite halutaan yhdistää 5G-verkkoon, sen täytyy suorittaa onnistunut synkronointi UL- ja DL-kanavilla. DL synkronointi tapahtuu, kun käyttölaite onnistuneesti purkaa SSB-viestin (Synchronization Signal Block). UL-kaistan synkronoinnin ja RRC (Radio Resource Control) -yhteyden muodostamiseksi käyttölaitteen on suoritettava CBRA (Contention Based Random Access) RACH-prosessi (Random Access Channel) (Kuva 12.). RRC-asetuspyyntö tapahtuu MSG3:ssa, jossa käyttölaite lähettää yhteyden muodostamissyyn. Tukiasema ohjaa sisäänpääsyä ensin DU:ssa (Distributed Unit) ja sitten CU:ssa (Centralized Unit), ennen kuin se lähettää RRC-asetuksen takaisin käyttölaitteelle, joka vastaa viestillä RRC Setup Complete. CBRA:ssa useat laitteet voivat lähettää jaetulla kanavalla samanaikaisesti, ja kanavaan päästään satunnaisen peruutusalgoritmin avulla. Kun laite haluaa lähettää kanavalle, se odottaa ensin satunnaisen ajan ja tarkistaa sitten, onko kanava vapaa. Jos kanava on vapaa, laite voi lähettää viestin. Jos kanava ei ole vapaa, laite odottaa pidemmän satunnaisen ajan ennen uudelleentarkistusta. Tätä prosessia toistetaan, kunnes laite pystyy lähettämään viestin. (Techplayon, 2020b)

Kuva 12. CBRA-tyyppinen RACH-prosessi (Techplayon, 2020b)



Toisen tyyppinen RACH-prosessi on CFRA (Contention Free Random Access), jota käytetään yleisesti solunvaihto prosessissa. CFRA:ssa kanavaan päästään käyttämällä ajoitettua tai koordinoitua lähestymistapaa. Laitteet, jotka haluavat lähettää kanavalla, pyytävät pääsyä kanavalle tiettyinä aikoina, ja tukiasema tai liityntäpiste myöntää tai estää pääsyn kanavan saatavuuden perusteella. Näin kanavan käyttöä voi hallita tehokkaasti ja varmistaa, että useat laitteet voivat käyttää kanavaa aiheuttamatta häiriöitä tai törmäyksiä. CFRA eroaa CBRA:sta niin, että siinä gNB aloittaa viestinvaihdon käyttölaitteen mittausraportin seurauksesta (Kuva 13). (Techplayon, 2020b)

Kuva 13. CFRA-tyyppinen RACH-prosessi (Techplayon, 2020b)



RACH on kanava, jota käytetään tietoliikennejärjestelmissä viestinnän aloittamiseen. Mobiililaitteet tai muut laitteet käyttävät sitä pyytääkseen pääsyä verkkoon ja muodostaakseen yhteyden tukiasemaan tai liityntäpisteeseen. Matkapuhelinverkossa mobiililaite käyttää RACH:ia puhelun muodostamiseen tai datan lähettämiseen verkkoon. Kun mobiililaite haluaa kommunikoida verkon kanssa, se lähettää RACH:lla viestin, jonka tukiasema vastaanottaa. Tukiasema osoittaa sitten omistetun kanavan viestintää varten, ja mobiililaite voi sitten lähettää ja vastaanottaa dataa tällä kanavalla. RACH on jaettu kanava, joka tarkoittaa, että useat laitteet voivat käyttää sitä samanaikaisesti. Sen varmistamiseksi, että RACH:lla lähetetyt viestit eivät katoa tai vioitu, ne lähetetään käyttämällä virhekorjauskoodia. Tukiasema käyttää aikajaksoihin perustuvaa algoritmia varmistaa, että RACH-prosessia käytetään tehokkaasti ja että kaikilla laitteilla on mahdollisuus päästä verkkoon. (Sharetechnote, n.d.b)

Muita saavutettavuuteen liittyviä seurattavia KPI:tä ovat esimerkiksi SA- ja NSA-käyttäjien määrä tietyssä ajanjaksona. Testaajan näkökulmasta kyseiset laskurit ovat hyödyllisiä, jos halutaan varmistaa, ettei testauksen aikana ole ollut muita laitteita tukiasemassa kiinni.

8.2 Säilytettävyyys

Säilytettävyyys (engl. Retainability) on yksi eniten käytetyistä verkon suorituskyvyn arvioinnissa käytetyistä laskureista. Säilytettävyydellä tarkoitetaan kykyä säilyttää yhteys, kunnes se normaalisti päättyy. 5G-radiosiirtotien päättymisen voi käynnistää sekä gNB että AMF. Päättymiset voivat tapahtua normaaleista tai epänormaaleista syistä. 5G tukiasemassa on joukko laskureita, jotka antavat tietoa miksi gNB katkaisi yhteyden, tai kuinka monta kertaa AMF päätti yhteyden. Näillä laskureilla voidaan tarkastella epänormaalisti päättyneitä yhteyksiä, mutta epänormaalisti päättynyt yhteys ei aina ole huono asia. Puhelun tippuminen tarkoittaa, että samalla voi tutkia puhelun uudelleenmuodostamista. Mikäli relaatio naapurisolun puuttuu tai kanavanvaihto ei ole käytössä, epänormaali päättyminen voi olla parempi ratkaisu yleisen suorituskyvyn kannalta. Tässä voidaan mitata esimerkiksi, kuinka herkästi tapahtuu RLF (Radio Link Failure) huonoissa radio-olosuhteissa. Joskus käyttölaitte päättää katkaista 5G-yhteyden esimerkiksi suojautuakseen ylikuumentumiselta tai säästääkseen akkuvirtaa. Tällaisia päättyisiä pidetään usein epänormaaleina.

5G-verkossa on olemassa useita tekijöitä, jotka voivat vaikuttaa säilytettävyyteen, kuten signaalin voimakkuus, häiriöt ja verkon ruuhkautuminen. Säilytettävyyys määrää palvelun laadun ja käyttökokemuksen verkkoa käytettäessä. Säilytettävyyden KPI:t mitataan usein onnistuneen puhelun tai istunnon säilyttämisen prosenttiosuutena tietyn ajanjakson, kuten päivän tai viikon aikana. Korkea säilytettävyyden KPI osoittaa, että verkko on luotettava ja pystyy ylläpitämään yhteyksiä pitkiä aikoja, kun taas alhainen KPI voi viitata verkon ongelmiin, jotka on ratkaistava. Säilyvyyden parantamiseksi 5G-verkossa on verkko suunniteltava hyvin ja käyttöönotto optimoitava. Näiden laskureiden säännöllinen seuranta voi auttaa tunnistamaan verkon ongelmat ja mahdollistaa ennakoivien toimenpiteiden toteuttamisen suorituskyvyn parantamiseksi.

8.3 Liikkuvuus

Liikkuvuus (engl. Mobility) on 5G-verkon tärkeä osa-alue, sillä se mahdollistaa katkeamattoman tiedonsiirron loppukäyttäjälle solunvaihdon avulla. Solunvaihdot ovat helppo mitata ajanjaksolla tapahtuneiden onnistuneiden solunvaihtojen prosenttiosuudella. Solunvaihto tarkoittaa sitä, että mobiililaitte vaihtaa solusta toiseen säilyttäen samalla

aktiivisen yhteyden. 5G-verkoissa solunvaihdot tapahtuvat joko taajuuksien välisinä, tai taajuuksien sisäisinä solunvaihtoina. Solunvaihdon suorituskyvyn optimointi on operaattoreille tärkeä suorituskykymittari sujuvan ja saumattoman käyttökokemuksen varmistamiseksi 5G-verkoissa.

Opinnäytetyössä käytetyssä testiympäristössä käytetään kolmea erilaista solunvaihtotekniikkaa. Tukiasemassa A, joka koostuu kahdesta eri solusta, tapahtuu tukiaseman sisäinen solunvaihto, mutta DU (Distributed Unit) vaihtuu. Tämänkaltaista solunvaihtoa kutsutaan inter-DU intra-CU solunvaihdoksi. Tukiasemassa B on käytössä yksi solu, joten tästä tukiasemasta tapahtuu vain inter-gNB solunvaihtoja. Tukiasemassa C on käytössä kaksi solua, jotka ovat kiinni samassa DU:ssa, joten solunvaihto on intra-gNB.

8.4 Tiedonsiirtokapasiteetti

Solutasolla tiedonsiirtokapasiteetti kertoo solun kaikkien käyttäjien yhdistettyä suorituskykyä. Pää tarkoituksena on ilmaista määrällisesti, kuinka paljon radiorajapinta pystyy tarjoamaan suorituskykyä. Alhainen solujen suorituskyky voi johtua monesta eri tekijästä, kuten radiopeitosta, ulkoisista häiriöistä, toimintojen aktivointien puutteesta tai parametrisoinnista. Kun alhaisen suorituskyvyn soluja tunnistetaan, tarvitaan KPI- ja konfiguraatioanalyysiä solutasolla perimmäisen syyn ymmärtämiseksi. Kiinnostuksen kohteena on yleensä keskimääräinen suorituskyky eikä huippusuorituskyky. Alhainen suorituskyky voi johtua esimerkiksi liian pienestä siirtokapasiteetista tai liian suuresta prosessorikuormituksesta gNB:ssä. Eri protokollakerrosten välisiä eroja on myös hyvä ymmärtää, esimerkiksi MAC- ja RLC-kerroksen välinen volyyymiero.

Tiedonsiirtomäärää voidaan mitata eri protokollakerroksilla, kuten MAC PDU, MAC SDU, RLC low, RLC high ja PDCP. Tiedonsiirtoaika voi olla koko mittausjakso, tällöin katsotaan enemmän tietoliikennemäärää kuin suorituskykyä. Tässä tulee ottaa huomioon, että arvot ovat alhaisemmat, jos solussa on vain vähän tietoliikennettä. Toinen tapa tutkia tiedonsiirtokapasiteettia on tarkastella vain niitä varattuja aikavälejä (engl. Slot), joissa tietoliikennettä on mukana. Näin voidaan helpottaa tutkimista tilanteesta, jos solussa on ollut vähemmän tietoliikennettä. Keskimääräinen suorituskyky lasketaan keskiarvoksi mittajaksolta. Vaikka tiedonsiirtoaikaan käytettäisiin vain aktiivisia aikavälejä, tuloksena

oleva suoritusteho on silti mittausjakson keskiarvo. Huippukapasiteetti perustuu tiettyyn sekuntiin, jolloin suurin osa datamäärästä on siirretty. Ainoa tiedossa oleva tieto on siirretty datamäärä.

Käyttäjän tiedonsiirtokapasiteetti on yksi tärkeimmistä suorituskykymittareista 5G-verkossa. Käyttäjän suorituskyvyn mittaamisessa on monia yhtäläisyyksiä solujen suorituskyvyn kanssa, ja monet haasteista ovat samat, esimerkiksi radiorajapinnan laatu ja tyypillinen verkkoliikenne, missä on paljon pieniä tiedonsiirto purskeita. Ruuhkaisen tietoliikenteen aikana solun tiedonsiirtokapasiteetti on yleensä korkea, koska on todennäköisempää, että jokainen aikaväli on täynnä. Tässä tapauksessa käyttäjän suorituskyky on alhaisempi, koska monet käyttäjät jakavat solun resurssit. Tyypillisessä operaattorin verkossa on paljon erilaista UP-tason tietoliikennettä esimerkiksi chat-viestejä, videoiden suoratoistoa, tiedostojen siirtoa, verkkoselailua ja äänipuheluita. Tässä yhteydessä tärkeä ominaisuus on kunkin yksittäisen tiedonsiirto purskeen koko radiorajapinnassa.

9 Toteutus ja yhteenveto

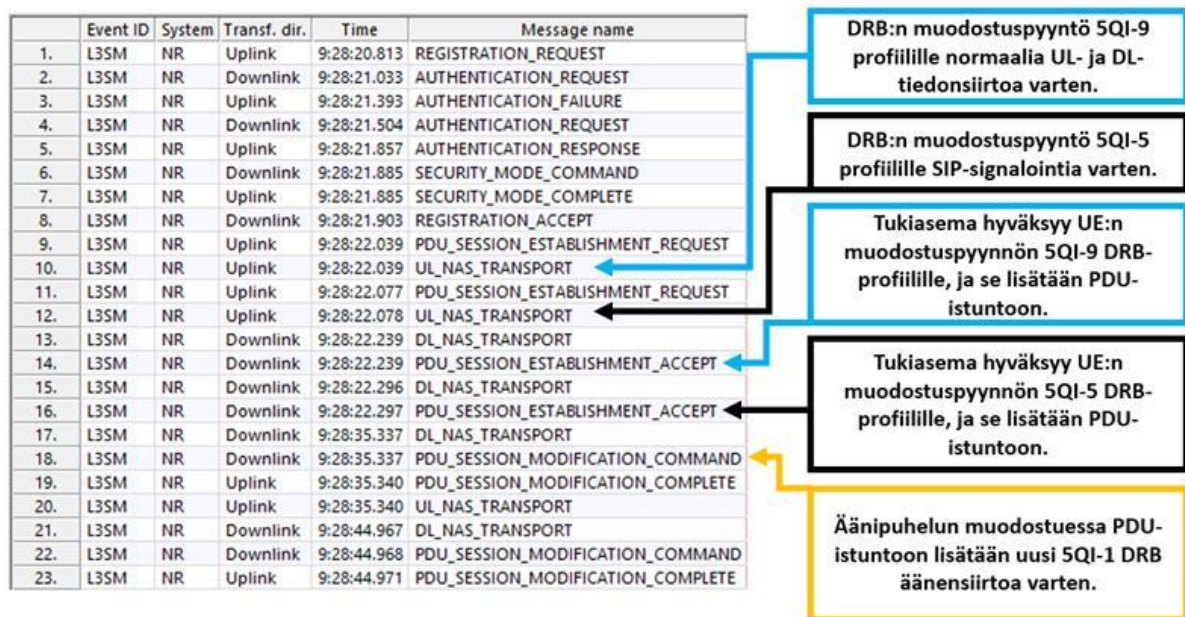
Toteutus aloitettiin tutkimalla, miten VoNR-ominaisuus aktivoidaan tukiasemassa. Tukiaseman konfigurointiin kuuluu verkkoyhteyden, toimintataajuuden ja muiden teknisten parametrien määrittäminen. Työn tarkoituksena on lisätä VoNR-ominaisuus kolmelle jo käytössä olevalle tukiasemalle, joten verkkoyhteyttä ja toimintataajuutta ei tarvitse erikseen konfiguroida. Aktivointi prosessi alkoi muokkaamalla 5QI-5:een liittyviä parametreja, jotta puhelun muodostamisen aikana puhelin pystyy suorittamaan IMS-rekisteröinnin IMS-runkoverkkoon. 5QI-5 -palvelu linkitetään tiettyyn DRB-objektiin. DRB-objektissa määritellään resurssityyppi, joka osoittaa prioriteetti tason lähteville paketeille. Äänipuhelun kannalta 5QI-5 on olennainen osa, sillä ilman sitä äänipuhelua ei voi muodostaa IMS-runkoverkon kautta. Äänipuhelun muodostusta varten konfiguroidaan uusi DRB-objekti, johon linkitetään korkean tason 5QI-1 -palvelu taatulle bittinopeudelle. Taattu bittinopeus on vähimmäismäärä tiedonsiirtoa, jonka verkko on velvollinen tarjoamaan käyttäjälle. Äänipuheluissa ei käytetä suurta tiedonsiirtonopeutta, joten taatun bittinopeuden vähimmäismäärä voidaan konfiguroida matalaksi. Yksi ajoreitillä käytetyistä tukiasemista on konfiguroitu käyttämään DSS-teknologiaa, ja tämä tukiasema vaatii erilaista parametrisointia 4G:n takia.

Tukiasemien konfiguroinnin jälkeen valmisteltiin käyttölaitteet. Käyttölaitteeksi valittiin Nokia XR20, koska esitutkinta osoitti tämän mallin tukevan DSS- ja VoNR-ominaisuutta. Kaupallista ohjelmistoversiota ei voitu käyttää tässä testissä, koska käyttölaite voisi muodostaa yhteyden testiin kuulumattomiin tukiasemiin tai testiympäristöihin. Ratkaisu tähän oli saada myyjältä R&D-ohjelmisto, jotta puhelimen NV-kohteita saadaan muutettua, tarkemmin puhelimen modeemiasetuksia. Tärkeää tässä on sallia puhelin tukemaan sitä kaistaa, jota tässä testiympäristössä käytetään. VoNR-äänipuhelu tarkoittaa, että CP- ja UP-liikenne kulkee 5G-verkon kautta, joten kaikki relaatio 4G-tasolle kielletään. NV-kohteilla puhelin voidaan pakottaa toimimaan 5G SA-tilassa. IMS-linkki ja 5G-tuki äänensiirtoa varten sallittiin myös NV-kohteiden avulla. SIM-korttien tilaus varmistettiin 5G-runkoverkosta, jotta VoNR-puhelu oli mahdollista toteuttaa.

Tukiasemien ja käyttölaitteiden valmistelun jälkeen tutkittiin puhelimen kyvykkyyttä tukea vaadittuja teknologioita. Puhelun ja äänipuhelun muodostamisesta kerättiin lokitiedot, joista varmistettiin käyttölaitteiden suorittavan vaadittavat rajapintasignaaloinnit (Kuva 14.).

Puhelun muodostamisesta otettiin paketin kaappaus tukiaseman rajapinnasta, ja tästä saatiin varmistus pakettien kulkemisesta 5G-runkoverkkoon.

Kuva 14. Rajapintasignalointi puhelun ja äänipuhelun muodostamisesta



Näiden testien jälkeen aloitettiin liikkuvuustestit. Ensimmäisessä liikkuvuustestissä varmistettiin, että tukiasema, johon DSS-ominaisuus on konfiguroitu, tukiaseman sisäiset

solunvaihdot toimivat. Tässä osiossa tukiasemaohjelmistosta löydettiin vika, ja tästä vastuussa oleva ryhmä onnistui tekemään siihen korjauksen. Toisessa liikkuvuustestissä tutkittiin, miten tukiasemien välinen solunvaihto tapahtuu, ja tästä osiosta ei löytynyt vikoja. Viimeisessä liikkuvuustestissä puhelimet lisättiin autoon sijoitettuun etäohjattavaan ohjelmistoon kiinni, jonka jälkeen testattiin toimivuutta koko ajoreitillä ilman ongelmia (Kuva 15.).

Kuva 15 5G FDD KPI -testiympäristön ajoreitti, tukiasemat ja solujen suunnat



Työn viimeisessä osiossa otettiin käyttöön uudet VoNR KPI:t ja niistä luodut kaavat. Tukiasemilta kerättiin verkon muodostamat KPI:t jälkianalyysiä varten. Laskureiden muodostamasta tiedosta ei erikseen tarvinnut luoda uusia kaavoja, vaan valittiin jo luoduista kaavoista raportointiin soveltuvimmat (Kuva 16.).

Kuva 16. Kuva taulukosta, jossa on verkkotasolla muodostuneet KPI:t ajotestistä

VoNR KPI kuvaus	Tukiasema A	Tukiasema B	Tukiasema C	Huomautus
	Keskiarvo	Keskiarvo	Keskiarvo	
5G SA GBR-puhelun pitoaika	61,72	62,22	61,7	Laskuri on aktiivisen äänipuhelun aikana käynnissä, testin aikana VoNR-puhelin on välillä toimitettomassa tilassa
5G SA GBR DRB asetuksen onnistumissuhde	100	100	100	Laskurissa katsotaan onnistuneesti muodostettujen äänipuheluiden prosenttilukua
5G SA 5QI-1 QoS-palvelun pudotussuhde – RAN-näkymä	0	0	0	Verkkotason KPI, jossa tarkastellaan onko säilytettävyyks kunnossa
5G SA 5QI-1 QoS-palvelun pudotussuhde – Käyttäjänäkymä	1,52	0	2,63	Laitetason KPI, jossa tarkastellaan onko säilytettävyyks kunnossa
5G SA 5QI-1 QoS-palvelun asetuksen onnistumissuhde ilman varatoimia	100	100	100	Varatoimi tarkoittaa pudotusta 5G-tasolta 4G-tasolle

Lopullinen tulos opinnäytetyölle oli onnistunut, testiympäristöön lisättiin VoNR-toiminnallisuus ja käyttölaitteet lisäksi ajotestiä. Saadessani ehdotuksen työtä varten esimieheltäni, oma tietämys äänipuheluihin liittyen oli suppea. Työn onnistumiseen vaikutti paljon hyvä suunnittelu, työkalujen tuki ja perehtyminen eri 5G-järjestelmän teknisiin osa-alueisiin. Työn aikana sain tutustua moneen eri työkaluun, joiden osaaminen auttaa jatkossa. Haastavinta työssä oli sisäistää suuri määrä uutta tietoa, mutta koen tämän työn

antaneen hyvän käsityksen äänipuhelun perusteista syvemmällä tasolla. Tehtävässä saadut opit auttavat varmasti jatkossa uusien haasteiden kanssa. Tieto siitä, että onnistunut lopputulos tulee osaksi Nokian kenttätestausta toimi hyvänä motivaation lähteenä ja loi halua pääsemään mahdollisimman hyvään lopputulokseen.

Lähteet

3GPP. (15.12.2018).

<https://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/ran-r16-schedule>

5G-tools. (6.2020). *5G NR ARFCN calculator*.

<https://5g-tools.com/5g-nr-arfcn-calculator/>

Abbas, M. (n.d.). *Quality of Service (QoS) in 5G networks*.

<https://5ghub.us/quality-of-service-qos-in-5g-networks/>

Azar. (n.d.). *Network Function | Session Management Function (SMF) in 5G Core Network | 5G System (5GS)*

<https://www.techtrained.com/network-function-session-management-function-smf-in-5g-core-network-5g-system-5gs/>

Cisco. (n.d.). *Key Performance Indicators (KPIs)*.

<https://developer.cisco.com/docs/network-automation-delivery-model/#!key-performance-indicators-kpis/key-performance-indicators-kpis>

Darah, D. (5.2022). *5G NSA vs. SA: How does each deployment mode differ?*

<https://www.techtarget.com/searchnetworking/feature/5G-NSA-vs-SA-How-does-each-deployment-mode-differ>

Devopedia. (2020). *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*.

<https://devopedia.org/orthogonal-frequency-division-multiplexing>

Devopedia. (19.11.2021a). *5G Technology*.

<https://devopedia.org/5g-technology>

ETSI. (9.2014). *Digital cellular telecommunications system*.

https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/123200_123299/123228/12.06.00_60/ts_123228v120600p.pdf

Fatseas, D. (7.2011). *Figure of a three-cell base station configuration*.

https://www.researchgate.net/figure/Figure-of-a-three-cell-base-station-configuration-Using-a-three-cell-configuration-can_fig1_277196084

Ghayas, A. (5.11.2019). *What Is A Mobile Core Network?*

<https://commsbrief.com/what-is-a-mobile-core-network/>

Holma, T. N. (2019). *5G Technology 3GPP New Radio*. Wiley.

- Jain, V. (19.5.2022). *The arrival of VoNR and what it means for service providers*.
<https://www.ng-voice.com/arrival-of-vonr-for-service-providers/>
- Joint Committee for Guides in Metrology. (Syyskuu 2010). *Guide to the expression of uncertainty in measurement*
https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf/cb0ef43f-baa5-11cf-3f85-4dcd86f77bd6
- Keysight. (n.d.). *Nemo Analyze Drive Test Post Processing Solution*.
<https://www.keysight.com/us/en/product/NTN00000B/nemo-analyze-drive-test-post-processing-solution.html>
- Keysight. (n.d.a). *Nemo Outdoor 5G NR Drive Test Solution*.
<https://www.keysight.com/us/en/product/NTA00002B/nemo-outdoor-5g-nr-drive-test-solution.html>
- Kollar, M. (10.2019). *Principles of NSA and SA operational modes*.
https://www.researchgate.net/figure/Principles-of-NSA-and-SA-operational-modes_fig2_335646887
- Kumar, R. (15.4.2020). *What Is the SIP Protocol?*
<https://www.softwareadvice.com/resources/what-is-sip/>
- Loshin, P. (10.2021). *Full-duplex*.
<https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/full-duplex>
- Metaswitch. (n.d.). *What is the IP Multimedia Subsystem (IMS)?*
<https://www.metaswitch.com/knowledge-center/reference/what-is-ims-ip-multimedia-subsystem>
- Nokia. (n.d). *Voice over 5G (Vo5G) core*.
<https://www.nokia.com/networks/core-networks/voice-over-5g-vo5g-core/>
- Qualcomm. (2020). *QXDM Professional™ Tool Quick Start*.
https://www.qualcomm.com/content/dam/qcomm-martech/dm-assets/documents/80-n9471-1_d_qxdm_professional_tool_quick_start.pdf
- Qualcomm. (n.d.a). *What is 5G?*
<https://www.qualcomm.com/5g/what-is-5g>
- Reply. (n.d.). *5G Technology: mastering the magic triangle*.
<https://www.reply.com/en/telco-and-media/5g-mastering-the-magic-triangle>
- RF Wireless World. (n.d.). *IMEI vs IMSI vs TMSI-difference between IMEI,IMSI,TMSI*.
<https://www.rfwireless-world.com/Terminology/IMEI-vs-IMSI-vs-TMSI.html>

RF Wireless World. (n.d.a). *VoLTE Vs Vo5G | Difference between VoLTE and VoNR.*

<https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Difference-between-VoLTE-and-VoNR.html>

Saxen, T. (9.11.2019). *Self-driving cars will be supported by 5G network.*

<https://www.telia.fi/business/article/5g-comes-in-support-of-self-driving-cars>

Sharetechnote. (n.d.). *5G VoNR.*

https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_VoNR.html

Sharetechnote. (n.d.a). *Mobile Technology.*

https://www.sharetechnote.com/html/Mobile/m_Cellular_FDD_TDD.html

Sharetechnote. (n.d.b). *5G/NR - Initial Access/RACH.*

https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_RACH.html

Simbase. (10.5.2022). *Frequency Division Duplex.*

<https://www.simbase.com/iot-glossary-dictionary/frequency-division-duplex>

Singh, N. (5.1.2023). *What is the 5G Access and Mobility Management Function (AMF)?*

<https://techcommunity.microsoft.com/t5/azure-for-operators-blog/what-is-the-5g-access-and-mobility-management-function-amf/ba-p/3707685>

Sultan, A. (8.8.2022). *5G System Overview.*

<https://www.3gpp.org/technologies/5g-system-overview>

Tata Communications. (25.11.2022). *What is a core network and how does it work?*

<https://www.tatacommunications.com/knowledge-base/network-core-network-explained/>

Techopedia. (n.d.). *Core Network.*

<https://www.techopedia.com/definition/6641/core-network>

Techopedia. (5.8.2019a). *Baseband Unit (BBU).*

<https://www.techopedia.com/definition/33908/baseband-unit-bbu>

Techplayon. (9.7.2020). *5G Core (5GC) Characteristics.*

<https://www.techplayon.com/5g-core-5gc-characteristics/>

Techplayon. (28.11.2021a). *5G PDU Session and Its Types.*

<https://www.techplayon.com/5g-pdu-session-and-its-types/>

Techplayon. (5.8.2020b). *5G NR RACH Procedure Overview – CBRA & CFRA.*

<https://www.techplayon.com/5g-nr-rach-procedure-overview-cbra-cfra/>

Telecomkhabar. (15.6.2019). *CPRI Cable Function and Details in Telecom*.

<https://www.telecomkhabar.com/2019/06/cpri-cable-function-and-details-in-telecom/>

Traficom. (26.10.2020). *Myönnetyt MNC-tunnukset*.

<https://www.traficom.fi/fi/viestinta/laajakaista-ja-puhelin/myonnetyt-mnc-tunnukset>

Viola, C. (10.7.2020). *Seven reasons why operators are backing dynamic spectrum sharing*.

<https://www.policytracker.com/blog/seven-reasons-why-operators-are-backing-dynamic-spectrum-sharing/>

Witte, B. (16.4.2020). *The basics of 5G's modulation, OFDM*.

<https://www.5gtechnologyworld.com/the-basics-of-5gs-modulation-ofdm/>