



Eetu Soronen

5G Cloud RAN ja sen järjestelmätestaus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Tieto- ja viestintäteknikka

Insinöörityö

1.4.2024

Tiivistelmä

Tekijä: Eetu Soronen
Otsikko: 5G Cloud RAN ja sen järjestelmättestaus
Sivumäärä: 44 sivua
Aika: 1.4.2024

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Tieto- ja viestintäteknikka
Ammatillinen pääaine: Ohjelmistotuotanto
Ohjaaja: Lehtori Jorma Rätty

Oppinäytetyön tavoitteena on antaa korkean tason selitys siitä, mitä Cloud RAN on ja miten se kehittää 5G-radioliityntäverkkoja eteenpäin. Työssä tarkastellaan, mitä haasteita perinteisissä 5G-verkoissa on esiintynyt ja miten näitä pyritään lievittämään ja ratkomaan tuomalla tavanomaisista datakeskuksista tutut pilvityökalut ja -teknologiat, kuten virtualisointi, palveluiden ja laitteiston hajauttaminen sekä avoimet rajapinnat osaksi mobiiliverkkoja.

Ennen Cloud RAN:ia työssä tarkastellaan perinteisiä 5G-radioliityntäverkkoja ja katsotaan, miten 5G-standardi on kehitetty ja miten Open RAN -hanke laajentaa tätä standardia tuotteeksi, jota Nokiolla ja Ericssonilla kutsutaan Cloud RAN:iksi ja Samsungilla vRAN:iksi. Erityisesti työssä katsotaan vielä Nokian Cloud RAN -konfiguraatioita ja sitä, miten nämä eroavat kilpailevista tuotteista.

Cloud RAN:in arkkitehtuurin jälkeen työssä tarkastellaan sen järjestelmättestausta, ja millaisia mobiiliverkoille sekä pilviteknologialle ominaisia haasteita siinä on. Tämän yhteydessä käydään läpi Nokian omia testiautomaatiotyökaluja, joiden suoriutumiskyvystä tehtävissään annetaan myös arvio.

Lopuksi annetaan lyhyt kuvaus Cloud RAN:in tulevaisuudesta, yli 5G:n elinkaareen kohti tulevia 6G-radioliityntäverkkoja.

Avainsanat: 5G, radioliityntäverkko, järjestelmättestaus, testiautomaatio

Tämän oppinäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Abstract

Author: Eetu Soronen
Title: 5G Cloud RAN and Its System Testing
Number of Pages: 44 pages
Date: 1 April 2024

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Information and Communications Technology
Professional Major: Software Engineering
Supervisor: Jorma Rätty, Senior Lecturer

The aim of the thesis is to provide a high-level view of what Cloud RAN is and how it advances 5G radio access networks. The thesis examines the challenges encountered in traditional 5G networks and how Cloud RAN seeks to alleviate and address them by introducing mobile networks to cloud tools and technologies such as virtualization, service and hardware disaggregation, and open interfaces.

The thesis also compares Cloud RAN with traditional 5G radio access networks. It examines how the 5G standard has been developed, and how the Open RAN initiative expands this standard into a product referred to as Cloud RAN by Nokia and Ericsson, and vRAN by Samsung. In particular, the thesis examines Nokia's Cloud RAN configurations and how they differ from competing products.

After examination of Cloud RAN architecture, the thesis looks more closely at how system testing of this product works in practice, and what challenges inherent to mobile networks and cloud technology it faces. To help with this, the thesis looks at automation tools used by Nokia, what they are, and how they are used in practice. A short evaluation of the effectiveness of these tools is also given.

At the end, the thesis also looks briefly at the future of Cloud RAN, beyond the lifecycle of 5G towards future 6G radio access networks.

Keywords: 5G, radio access network, system testing, test automation

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	3
2	Klassinen 5G	4
2.1	Mobiiliverkkojen uusin sukupolvi	5
2.2	Radioliityntäverkko eli RAN	9
2.3	5G:n standardiorganisaatiot	11
3	Cloud RAN	15
3.1	Cloud RAN -arkkitehtuuri	16
3.2	Tukiaseman pilkkominen kahteen	17
3.3	Tukiaseman pilvi-infrastruktuurikerros	20
3.4	Verkonhallintajärjestelmät	23
3.5	Nokian Cloud RAN:in konfiguraatiot	23
4	Nokia Cloud RAN:in järjestelmätestaus	25
4.1	Järjestelmätestien kulku	27
4.2	Järjestelmätestien kategoriat	28
5	Nokia Cloud RAN:in järjestelmätestien automaatiotyökalut	29
5.1	Robot Framework testikehyksenä	30
5.2	UltraCaller päätelaitteiden etähallinnassa	32
5.3	BFAT testien suorittajana	35
5.3.1	BFAT:in moduulit	36
5.3.2	System Under Test eli SUT	38
5.4	Testiautomaation yhteenveto	39
6	Cloud RAN:in tulevaisuus	42
	Lähteet	44

Lyhenteet

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i> . Mobiiliverkkojen merkittävin standardiorganisaatio, joka on vastuussa mm. 4G- ja 5G-standardeista.
BBU	<i>Baseband Unit</i> . Klassisessa 5G:ssä tukiaseman prosessointiyksikkö. Cloud RAN:issa tämä on pilkottu CU:hun ja DU:hun.
BFAT	<i>Basic Flexible Automatic Test</i> . Nokian Robot Framework -testikehykseen pohjautuva sovellus järjestelmätestien luomiseen ja ajoon.
CDRT	<i>Customer Delivery Regression Testing</i> . Asiakastilauksesta suoritettavia regressiotestejä. Näissä käytetään asiakkaan omia konfiguraatioita, ja ne ajetaan vain tilauksesta.
CRT	<i>Continuous Regression Testing</i> . Regressiotestit ovat säännöllisesti ajettavia testitapauksia, joilla vahvistetaan ominaisuuksien toiminnallisuus uusimmissa sovellusversioissa.
CU	<i>Centralized Unit</i> . Cloud RAN:issa tukiaseman osa, joka sijaitsee lähimpänä ydinverkkoa ja hallitsee yhtä tai useampaa DU:ta.
DU	<i>Distributed Unit</i> . Cloud RAN:issa tukiaseman osa, joka sijaitsee lähimpänä radioita ja on yhteydessä ydinverkkoon CU:n kautta.

FHGW	<i>Fronthaul Gateway</i> . Nokian Cloud RAN:ille ominainen verkkokytin radioiden ja DU:n välissä.
OCP	<i>Open Container Platform</i> . Red Hatin tarjoama pilvi-infrastruktuuriratkaisu, jota käytetään Nokian Cloud RAN:issa CU- ja DU-ohjelmistojen alustana.
Open RAN	Open RAN -hanke pyrkii avaamaan mobiiliverkkojen rajapintoja ja tekemään eri valmistajien verkoista yhteensopivia toistensa kanssa.
Päätelaite	Puhelin tai muu radioliityntäverkon kautta verkkoyhteyden saava laite.
Radioliityntäverkko	Mobiiliverkkojen komponentti, joka on vastuussa päätelaitteiden signaalin matkasta ydinverkkoon.
RAN	<i>Radio Access Network</i> eli radioliityntäverkko. Mobiiliverkon osa, joka muodostuu tukiasemista ja on yhteydessä ydinverkon kautta internetiin.
UltraCaller	Nokialla testauksessa puhelinten etähallintaan laadittu verkkosovellus, jota on usein yhdistetty BFAT:iin.
Ydinverkko	Mobiiliverkkojen komponentti, joka ohjaa verkkoa radioliityntäverkoista varsinaiseen internettiin.

1 Johdanto

Cloud RAN on 5G-radioliityntäverkkojen (RAN) uusin sukupolvi, jonka ensisijainen tavoite on tehdä 5G-verkoista halvempia ja tehokkaampia kuin mitä ns. klassisen 5G-radioliityntäverkon arkkitehtuuri sallii. Tämän työn tavoite on kertoa, mitä ongelmia klassisessa 5G:ssä on ilmennyt ja miten Cloud RAN pyrkii ratkomaan näitä virtualisoinnilla, avoimilla rajapinnoilla, sekä perinteisen RAN-tukiaseman pilkkomisella kahteen. 5G:n ja Cloud RAN-arkkitehtuurin kehitystä varten katsomme myös mobiiliverkkojen vallitsevaa standardiorganisaatiota, 3rd Generation Partnership Project:ia sekä Open RAN -hanketta.

Kun 5G:stä ja Cloud RAN:ista on tehty tarpeeksi yleispätevä katsaus, tarkastellaan erityisesti Nokian Cloud RAN -tuotetta ja sitä, miten tämän arkkitehtuuri eroaa alan muiden valmistajien tuotteista. Tätä varten Nokian Cloud RAN:ia verrataan Ericssonin Cloud RAN- ja Samsungin vRAN -tuotteisiin.

Nokian Cloud RAN -konfiguraatioiden katsauksen jälkeen voimme tarkemmin perehtyä siihen, miten näin laajaa ja monimutkaista tuotetta voidaan käytännössä testata kokonaisena järjestelmänä. Järjestelmätestauksesta annetaan yleinen kuvaus, jossa sitä verrataan muihin korkean tason testeihin. Katsomme myös millaisia järjestelmätestejä Nokia suorittaa Cloud RAN:ille; minkälaiset testit ajetaan vain kerran, minkälaiset säännöllisin väliajoin regressiotestiajoissa sekä viimeiseksi, mitä testejä suoritetaan teleoperaattorien tilauksesta asiakastoimituksen regressiotesteissä (Customer Delivery Regression Testing).

Nokia Cloud RAN:in järjestelmätestaukseen perehdytään syvemmin sen automaatiotyökalujen kautta. Nokialla testit automatisoidaan samasta yrityksestä alkunsa saaneella Robot Frameworkilla, jolle on luotu Nokian oma testien kehitys- ja suoritussympäristö BFAT.

BFAT on modulaarinen kehitysympäristö Robot Framework ja Python-ohjelmointikielien testeille. BFAT:iin voidaan lisätä erillisiä komponentteja, joilla voidaan mm. automatisoida testien raportointi sekä hallita järjestelmätestauksessa tarvittavia elementtejä kuten päätelaitteita. Automaatiotyökalujen katsauksen

lopuksi niiden suorituskyvystä ja toimivuudesta radioliityntäverkkojen kontekstissa annetaan vielä yhteenveto ja arviointi.

Automaatiotestit suoritetaan käyttäen samoja rajapintoja ja noudattaen samaa kulkua kuin manuaalisesti ajettavat testit, jonka takia automaatiotestien tarkastelu on hyvä tapa antaa yleinen ymmärrys sekä automaatio- että manuaalitestiajoista, sekä varsinkin siitä mikä Cloud RAN:in testauksessa on tärkeää. Automaatiotestit myös piilottavat työkalujen rajapintojen taakse monia monimutkaisempia asioita, joka on tämän työn kannalta hyvä asia. 5G, pilvi, radioliityntäverkot ja järjestelmättestaus ovat kaikki aiheita, joiden parissa monet ovat viettäneet koko uransa, eikä näistä ole tässä työssä mahdollista antaa muuta kuin korkean tason katsaus.

Työn lopuksi tarkastellaan vielä Cloud RAN:in tulevaisuutta. 5G:n kohdalla tulevaisuus näyttää jo hyvältä, ja monia merkittäviä kauppasopimuksia korvaamaan vanhoja sekä rakentamaan kokonaan uusia 5G-radioliityntäverkkoja on jo solmittu. Lisäksi Cloud RAN:in mukana tulleet avoimet rajapinnat on antanut mahdollisuuden monille uusille yrityksille tulemaan mukaan valmistamaan radioliityntäverkon pienempiä osia ja elementtejä.

Cloud RAN:in tuomat arkkitehtuurilliset muutokset ovat myös osoittautuneet niin lupaaviksi, että vaikka 6G:lle ei olekaan vielä tarkkaa spesifikaatiota, sitä on jo nyt kutsuttu mobiiliverkkojen ”ensimmäiseksi pilvinatiiviksi sukupolveksi”. Cloud RAN:in elinkaari siis näyttää pitkältä ja hyvältä, myös 5G:stä siirryttäessä tulevaisuuteen.

2 Klassinen 5G

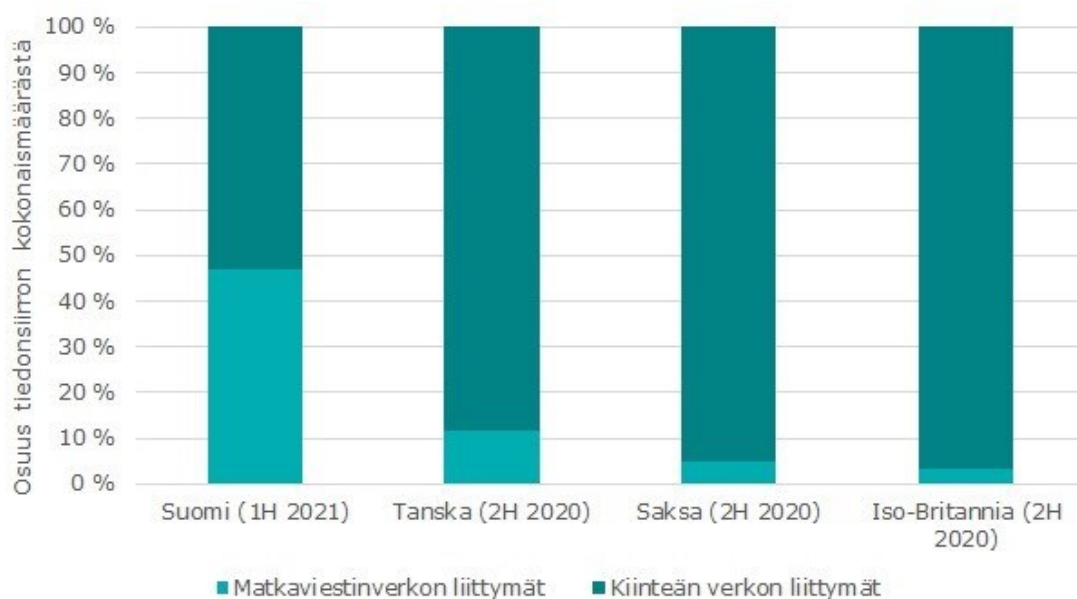
Tässä luvussa selitetään, mikä mobiiliverkkojen viides sukupolvi eli 5G on, mitä hyötyjä ja haasteita siinä on verrattuna aiempiin sukupolviin ja minkälainen sen arkkitehtuuri on. Arkkitehtuurissa erityisen tarkasti katsotaan 5G:n radioliityntäverkkoa, joka on perustana lukuun kolme, jossa tämä radioliityntäverkko siirretään pilveen. Vielä lopuksi katsomme 5G:n tärkeintä standardiorganisaatiota

3GPP:tä ja Open RAN:ia, joista molemmat ovat tärkeitä 5G:n ja Open RAN:in tapauksessa varsinkin Cloud RAN:in kehityksessä.

2.1 Mobiiliverkkojen uusin sukupolvi

5G-puhelinverkot voivat olla parhaimmillaan jopa 100 kertaa nopeampia kuin 4G [1]. Niiden korkeampi signaalin taajuus on myös tarkoittanut sitä, että teleoperaattorit tarvitsevat entistä enemmän tukiasemia saavuttaakseen yhdenvertaisuuden 4G-verkkojen kattavuuden kanssa [2]. Lisäksi haasteena on, että päätelaitteiden kuten älypuhelimien, sekä erityisesti viime vuosien aikana ns. IoT (Internet of Things) -laitteiden ja -sensorien määrä on räjähtänyt [3]. Esimerkiksi kaupunkien keskustassa tukiasemien täytyy pystyä palvelemaan jopa kymmeniä tuhansia laitteita samaan aikaan, kun taas maaseudulla määrä on murtoosa tästä. Kaikkiin tapauksiin sopiva tukiasema-arkkitehtuuri ei siis enää ole mahdollista.

Mobiiliverkkojen kysyntä on myös korkeampaa kuin koskaan ennen, eikä sen nousu ole pysähtymässä. Traficomien mukaan Suomessa vuonna 2021 jo lähes 50 % kokonaistiedonsiirrosta tapahtui mobiiliverkkojen kautta, joka näkyy myös kuvassa 1. Muissa maissa tämä luku on alhaisempi, mikä voidaan optimistisesti tulkita suurempana kasvupotentiaalina. Ericsson ennustaa 5G-dataliikenteen kasvavan 21 gigatavusta 56 gigatavuun jokaista matkapuhelinta kohti vuosien 2023 ja 2029 välillä. Samalla aikavälillä mobiiliverkkojen osuus tiedonsiirrosta odotetaan nousevan maailmanlaajuisesti 15 prosentista 76 prosenttiin. Tämä tulee suurilta osin luomaan uutta markkinaosuutta 5G-verkoille 4G-verkkojen osuuden syömisen sijaan. [5.]



Kuva 1. Mobiiliverkkojen osuus eri maiden tiedonsiirron kokonaismäärästä. [4.]

Tiheästi asutuilla alueilla mobiiliverkkojen täytyy siis pystyä palvelemaan enemmän asiakkaita, jotka käyttävät enemmän kaistaa ja vaativat pienempiä viiveitä kuin koskaan ennen. Tämä myös johtaa suurempiin eroihin tukiasemien suorituskyky- ja kapasiteettivaatimuksissa.

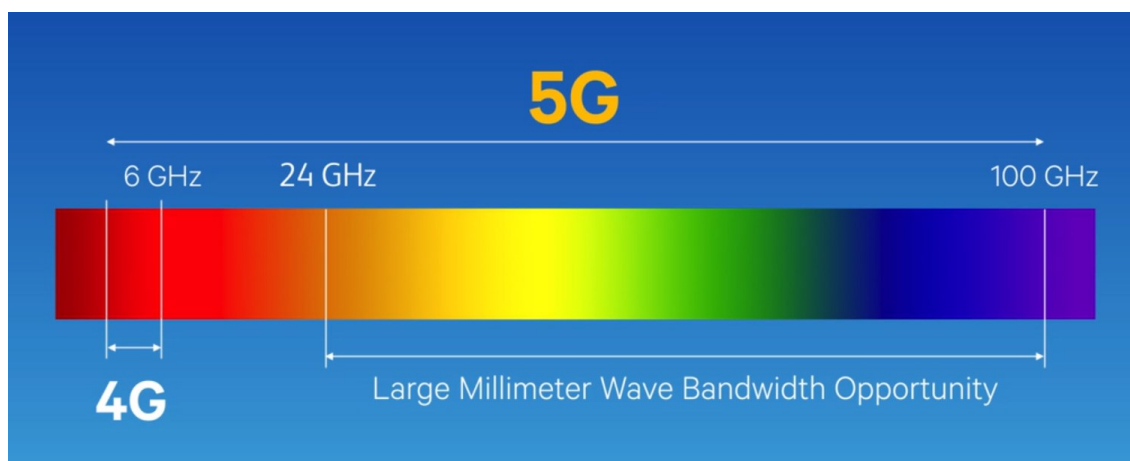
5G-teknologia kyllä toteuttaa kaikki sille asetetut tekniset vaatimukset. Se on nopeampi, viive on alhaisempaa ja samanaikaisia käyttäjiä voi olla enemmän kuin ennen. Periaatteessa kantavuuskin voi olla 4G:n kanssa yhtenäinen, koska 5G tukee myös 4G:n taajuusalueita.

Käytännössä kuitenkin 5G-verkkoja ei rakenneta korvaamaan 4G:tä, vaan 5G toimii sen rinnalla. Alueilla, joissa laitteita on paljon ja kaistavaatimukset korkeita hyötyvät eniten 5G:stä, jonka takia verkkoja rakennetaan ensisijaisesti niille alueille. 5G-verkkojen rakennuksen alkuvaiheissa se voidaan myös yhdistää 4G-verkkoihin ns. NSA (Non-Standalone) -verkoissa, joissa vain radioliityntäverkko on 5G:tä. NSA-verkoilla saadaan suurin osa 5G:n hyödyistä, mutta monissa vaativimmissa asioissa kuten verkon viipaloinnissa 4G-ydinverkko toimii koko verkkoa rajoittavana pullonkaulana.

Tietoturva on 5G:ssä myös saanut suuria edistyksiä. Verkkoja voidaan nyt viipaloida virtuaaliverkkoihin, jotka käyttävät yhteistä fyysistä laitteistoa. Yritykset voivat luoda omia 5G-verkkoja turvallisesti eristettynä muista verkoista sekä konfiguroida niitä heidän omien vaatimuksien mukaan. Esimerkiksi videon suoratoistopalvelut välittävät eniten datayhteyden nopeudesta ja vähemmän viiveestä, kun taas itseajaville autoille viive ja saatavuus ovat verkon tärkeimmät piirteet. [6.]

Nykyään yhden koon malliset verkot eivät siis enää riitä, koska vaatimukset ovat liian vaihtelevia eri käyttötapauksien välillä. Yhteiskäyttöinen infrastruktuuri verkon viipaloinnissa myös halventaa verkkojen hintaa. Eri yritykset ja käyttötapaukset voivat käyttää samaa laitekerrosta, mikä myös jättää vastuun verkkojen fyysisestä huollosta teleoperaattoreille. [6.]

Verkkojen määrän ja suurempien tehovaatimusten myötä 5G:n tuettu kaistanalue on 4G:tä huomattavasti korkeampi. 4G:ssä signaali voi kulkea verrannollisesti pienellä välillä, 450MHz – 3.8GHz [7]. 5G:ssä maksimitaajuus taas voi nousta jopa lähes sataan gigahertsiin. Yli 24 GHz:n taajuuksia kutsutaan niiden pituuden vuoksi millimetriaalloiksi, ja ne voidaan ottaa käyttöön matalampien taajuuksien rinnalla radioliityntäverkon kaikista tiheimmän kulutuksen alueilla [8]. Kuvassa 2 on näytetty 5G- ja 4G-verkkojen tukemat taajuusalueet, ja kuten siinä esiintyy, 5G tukee myös 4G:n vanhoja taajuusalueita.



Kuva 2. 4G- ja 5G-verkkojen taajuusalueet. yli 24 GHz:n taajuudet ovat millimetriaaltotaajuuksia. [9.]

Korkeamman taajuuden signaalit eivät kuitenkaan kannu yhtä pitkälle kuin matalan taajuuden signaalit, jonka takia käytännössä 5G kuitenkin palvelee yleensä n77-taajuusalueella tai sen tienoilla, eli noin 3,7GHz:ssä. Erittäin korkeat taajuusalueet toimivat lähinnä kilpailijana Wi-Fi:n kanssa alueilla, jotka vaativat hieman korkeampaa kantavuutta ja laajempia verkon konfiguraatiomahdollisuuksia kuin mitä Wi-Fi-standardi tarjoaa. [10.]

Viimeisenä suurena etuna 5G:ssä on sen tuki suuremmalle määrälle samanaikaisia yhteyksiä. 4G-verkoissa tukiasema voi palvella neliökilometrin alueella noin 4000 laitetta samanaikaisesti, kun taas 5G:ssä tämä luku voi olla jopa miljoona laitetta samalla alueella [11]. Päätelaitteiden räjähtänyt määrä tekee tästä hyvin tärkeän edun varsinkin kaupungeissa, joissa puhelimien lisäksi samaa verkkoa voivat käyttää erilaiset IoT-laitteet, kuten kamerat, itseajavat autot, erilaiset robotit, ja vaikka Smart-ovikellot. [6.]

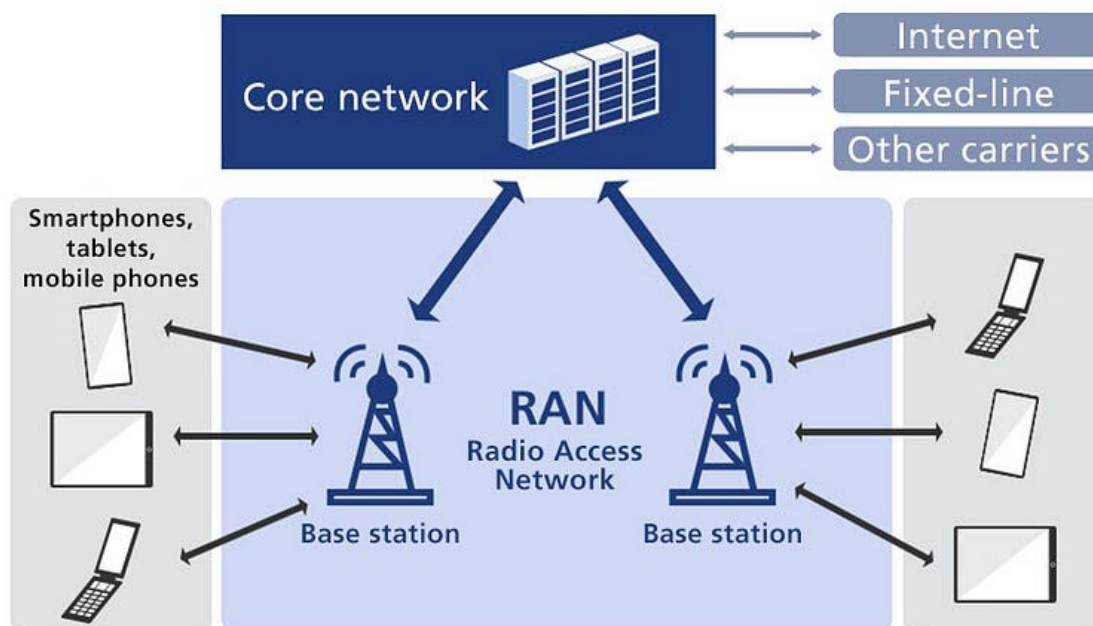
Eräänä haasteena 5G:ssä on, että vaikka se on pääsääntöisesti energiatehokkaampi kuin 4G, 5G:n korkeampi taajuusalue kuitenkin tulee nostamaan virrankulutusta päätelaitteissa. Tämä johtuu siitä, että signaalien lähettäminen ja vastaanottaminen vie enemmän energiaa korkeammilla taajuusalueilla, joka paheenee ennestään, jos tukiasema on kaukana päätelaitteesta. NSA 5G -verkoissa tämä on vielä merkittävämpi ongelma, koska vähemmän vaativat tehtävät kuten

puhelut ja tekstiviestit voivat silti kulkea 4G-verkon tukiasemien kautta. Puhelimen täytyy siis olla yhteydessä kahteen eri verkkoon, joka nostaa energiankulutusta ennestään. 5G-mobiiliverkkojen rakentajan ja operaattorin näkökulmasta tälle ei ole täydellistä ratkaisua, koska ongelma on niin moniulotteinen. 5G:n kypsyntyessä ja sen hinnan laskiessa kuitenkin NSA-konfiguraatioita tullaan vaihtamaan puhtaisiin 5G- eli SA (Standalone) -verkkoihin, ja samoin päätelaitteiden akut ja vastaanottimet tulevat kehittymään tehokkaammaksi, jonka toivotaan lieventävän 5G:n ominaisten heikkouksien merkitystä. [12; 13; 14.]

Suurin ja vaikein haaste 5G:ssä on kuitenkin sen saanti asiakkaille. 5G-verkot vaativat suuremman lukumäärän tehokkaampia ja täten kalliimpia tukiasemia kuin 4G. Tämä onkin syy 4G- ja 5G-verkkojen sekoittamiselle, ja on yleisestikin tehnyt 5G:n käyttöönotosta hitaamman ja kalliimman kuin teleoperaattorit ja verkkojen valmistajat olisivat toivoneet. 4G-verkot myös täyttävät vaatimukset vielä tarpeeksi hyvin suurelle osaa väestöstä, joka pienentää 5G:n kysyntää ja täten näiden verkkojen rakennustahtia. Verkkojen pieni kattavuus taas pienentää kysyntää ennestään. [15; 16].

2.2 Radioliityntäverkko eli RAN

Radioliityntäverkko (eng. Radio Access Network) eli RAN on osa mobiiliverkoista, joka hoitaa langattoman signaalin kulun päätelaitteiden kuten puhelinten ja radioiden välillä kohti ydinverkkoa. Signaali siis kulkee puhelimesta radioliityntäverkon kautta mobiiliverkon ydinverkkoon (eng. Core Network), jonka kautta se voi jatkaa matkaansa varsinaiseen internetiin.



Kuva 3. Mobiiliverkon korkean tason arkkitehtuuri. [17.]

RAN sisältää pelkkien antennien ja radioiden lisäksi myös tukiasemia, joissa radiosignaali lyhyesti sanottuna pilkotaan ja pakataan helpommaksi käsiteltävään ja kuljetettavaan muotoon, jolloin matka ydinverkkoon on nopeampaa ja sujuvampaa [18]. Kuvassa 3 RAN on esitetty vaaleansinisenä päätelaitteiden ja ydinverkon välissä olevana osana. Ydinverkko taas on verkon tummansininen osa, joka välittää tietoa RAN:ista mobiiliverkon ulkopuolelle.

Ennen tukiaseman prosessointia radion lähettämä signaali on erittäin latenssinherkkä, ja tukiaseman prosessointiyksikön eli BBU:n (Baseband Unit) täytyy tehdä paljon töitä sen eteen, että radion vastaanottamat paketit käsitellään oikeassa järjestyksessä. Tämän takia BBU:n enimmäisetäisyys radioista on vain muutama kilometriä, ja jopa tämän säteen sisällä signaalin välittävän valokuitukaapelin pituuden aiheuttama latenssi pitää ottaa huomioon BBU:n ohjelmistokonfiguraatiossa. Alhainen viive radion ja BBU:n välillä on elintärkeää, koska kaikki aikaherkät asiat käsitellään siellä. Pienikin viive täällä on nopeasti huomattavissa kuluttajalle.

Mobiiliverkko koostuu radioliityntäverkon lisäksi myös ydinverkosta. Ydinverkko voi sijaita satojen kilometrien päässä päätelaitteista ja tiedonkulku radioliityntäverkon ja ydinverkon välillä on langallinen. 5G-radioliityntäverkko voi myös uudelleenkäyttää 4G:n ydinverkkoja, jolla saadaan suurin osa 5G:n hyödyistä kuluttajille. Täysin 5G-tekniikalla rakennettua mobiiliverkkoa kutsutaan SA- eli Standalone-verkoksi.

Ydinverkko pitää huolta mobiiliverkon ulkopuolisen kommunikaation lisäksi myös päätelaitteiden luovutuksesta tukiasemalta toiselle, joka tapahtuu kuluttajan matkustaessa yhden tukiaseman kantavuuden ulkopuolelle. Ydinverkko on keskitetty ja sijaitsee yleensä isoissa datakeskuksissa, jonka takia sen huolto ja ylläpito on halvempaa kuin radiotukiasemien. Siellä voidaan myös hyödyntää yleiskäyttöisempää ja täten halvempaa teknologiaa kuin mikä on mahdollista radioliityntäverkoissa.

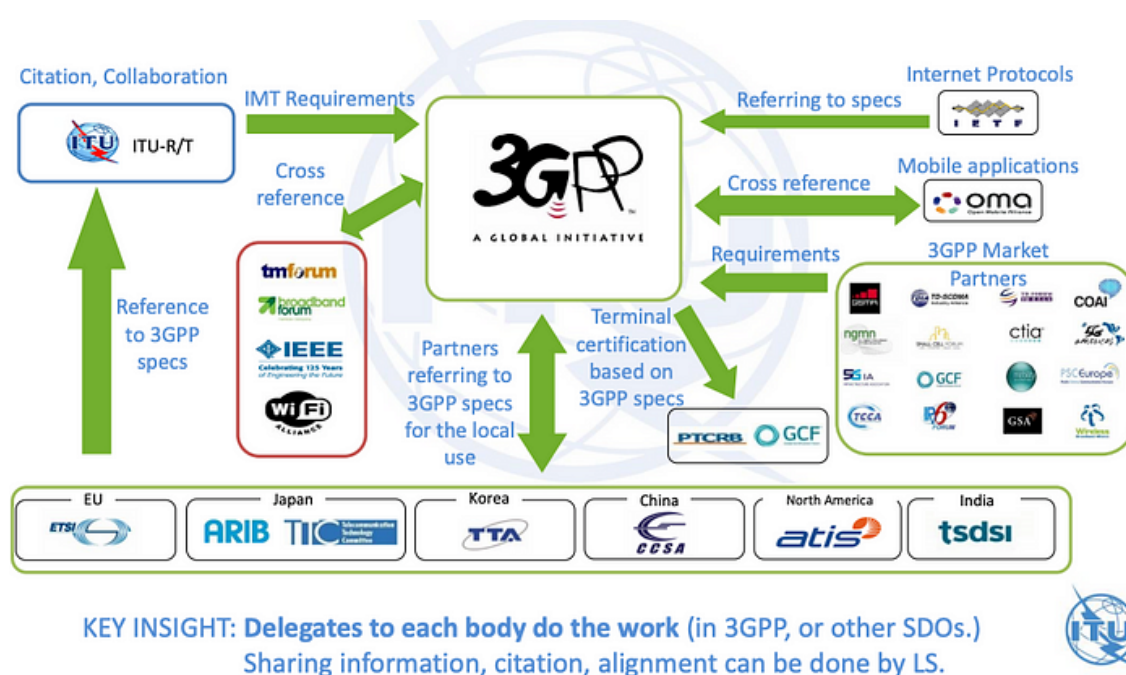
Ydinverkko on harvoin radioliityntäverkkoja tutkiessa oleellinen, eikä sitä tässä työssä käydä tarkasti läpi. Se on kuitenkin hyvä tiedostaa, koska sen täytyy aina olla olemassa ja saavutettavissa.

2.3 5G:n standardiorganisaatiot

3rd Generation Partnership Project eli 3GPP on vuonna 1998 perustettu yhteisö, joka on vastuussa mobiiliverkkojen suurimmista ja tärkeimmistä standardeista. Nämä standardit määrittävät radioverkkojen tekniset vaatimukset ja ovat tärkeitä varmistamaan, että varsinkin päätelaitteet pystyvät kommunikoimaan kaikkien standardin toteuttavien verkkojen kanssa.

3GPP on siis vastuussa siitä, minkälaiset ehdot verkon pitää täyttää, jotta sitä voidaan kutsua esim. 4G- tai 5G-verkoksi. Se määrittää verkkojen kommunikatioprotokollat ja sertifioi ehtojen täyttäviä tuotteita. 5G:n verkkojen tärkein standardi 3GPP:n 5G New Radio (5G NR) samoin kuin LTE (Long-term Evolution) on vallitseva standardi 4G-verkoissa. [19.]

Vaikka 3GPP on mobiiliverkkojen tärkein standardiorganisaatio, se ei kuitenkaan luo standardeja yksin tai edes tarjoa yhtä maailmanlaajuista 4G- tai 5G-standardia. Standardin kehityksessä otetaan huomioon monia paikallisesti olennaisia tahoja, ja valmiin standardin sovittamisesta eri markkinoille vastaavat erilaiset aluekohtaiset standardiorganisaatiot. EU:ssa mobiiliverkkojen standardista on pääsääntöisesti vastuussa European Telecommunications Standards Institute eli ETSI. 3GPP:n kumppaniorganisaatiosta on näytetty kuvassa 4. [20; 21.]



Kuva 4. 3GPP:n kanssa yhteistyökumppaneita verkkostandardien luomisessa. [21.]

3GPP ei kuitenkaan ota kantaa radioverkkojen tukiasemien tai radioiden sisäiseen toteutukseen, eikä se vaadi radioverkon laitteiden olevan yhteensopivia tai käyttämään yhteisiä rajapintoja tuotteiden valmistajien välillä. Tämän takia perinteisesti teleoperaattorit ovat olleet hyvin riskiin altistuneita lukkiutumaan yhden valmistajan tuotteisiin. Varsinkin tukiasemien vaihtaminen uuteen valmistajaan tulee erittäin kalliiksi hyvin nopeasti. Valmistajien tuotteiden yhteensopimattomuus tarkoittaa myös sitä, että jokaisen valmistajan tuotevalikoimassa on

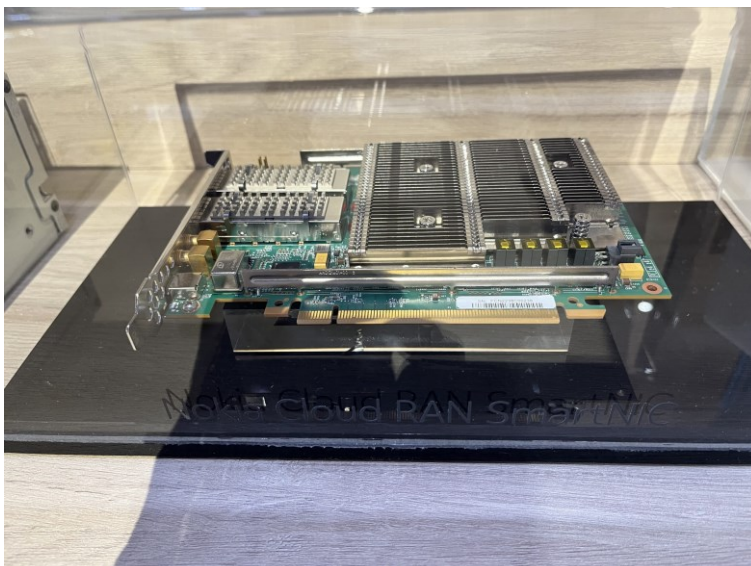
oltava kaikki mobiiliverkon elementit, joka vaikeuttaa uusien yritysten liittymistä mukaan kilpailuun. [19.]

Mobiiliverkkojen avaamista varten alan yritykset ovat laatineet uuden hankkeen nimeltä Open RAN, jossa radioliityntäverkon sisäiset rajapinnat pyritään avaamaan ja yhtenäistämään. Tämän tavoitteena on mahdollistaa valmistajien kuten Nokian tai Ericssonin tuotteiden yhteensopivuus, joka estäisi operaattorien lukkiutumista yhteen tarjoajaan. Samoin kokonaan uudet valmistajat voivat alkaa valmistamaan yksittäisiä osia tai elementtejä radioliityntäverkoissa.

Open RAN käsittelee erityisesti radioita, jotka ovat tyypillisesti radioliityntäverkon kallein osa. Kuitenkin myös RAN:in muut elementit kuten verkonhallintajärjestelmät ja BBU:t pyritään avaamaan. Open RAN -hankkeelle on myös perustettu yhteisö, O-RAN Alliance, jonka tavoitteena on avata rajapintoja ja edistää yhteensopivuuden luomista eri valmistajien laitteiden välillä. Pää tavoitteena siis on, että eri valmistajien radioita, tukiasemia ja muita tuotteita voidaan käyttää yhdessä keskenään.

Open RAN:in mukana saapuvassa uudistetussa arkkitehtuurissa on jotain yleisesti hyväksytyjä piirteitä, kuten tukiaseman pilkkominen kahteen, mutta monista pienemmistä yksityiskohdista ei olla vielä päästy yksimielisyyteen. Open RAN on melko uusi hanke, joka on hyvin läheisesti yhteydessä 5G:hen ja varsinkin Cloud RAN:iin.

Suurin kiista Open RAN:issa tällä hetkellä koskee Nokian SmartNIC:iä (Smart Network Interface Card). SmartNIC on BBU:n prosessointitarpeita varten tarkoitettu kiihdytin, joka hoitaa monia aikaherkkiä tehtäviä, joihin tavallinen keskusprosessori ei kykene. Kuten kuvassa 5 näkyy, SmartNIC on ihan normaalisti PCIe-liitäntään kytkettävä kortti, joka voidaan asentaa lähes kaikkiin palvelinympäristöihin.



Kuva 5. Nokian SmartNIC-kiihdytinkortti [22.]

Ericsson ja Samsung taas ovat päätyneet Intel-pohjaiseen ratkaisuun, jossa SmartNIC:n funktiot tapahtuvat suoraan mobiiliverkoille suunnitellussa keskusprosessorissa. Hintana Ericssonin ja Samsungin ratkaisussa on, että prosessorin on oltava Intelin varta vasten mobiiliverkoille tuottama. Tämä ratkaisu tulee kalliimmaksi kuin yleissaatavien palvelinprosessorien käyttö.

Nokian SmartNIC-korttia käyttävä Cloud RAN -ratkaisu sallii suuremman määrän valintaa palvelimien osissa, ja käyttämään ei-Intel pohjaisia sekä yleiskäyttöön tarkoitettuja keskusprosessoriratkaisuja. Sen tehokkuus ja suorituskyky verrattuna varta vasten rakennettuun keskusprosessoriin on kuitenkin vielä kiistanalainen. SmartNIC tuo myös ylimääräisen komponentin ja sen myötä ylimääräistä monimutkaisuutta jo ennalta monimutkaiseen järjestelmään.

Mihin suuntaan Open RAN menee ja mikä on SmartNIC:in tulevaisuus, on vielä epäselvää. Nokia on hävinnyt monia sopimuksia Cloud RAN -verkkojen rakentamisesta tästä erillisistä syistä, joka väistämättä heikentää myös Nokian SmartNIC-pohjaisen ratkaisun viehättävyyttä. [23.]

3 Cloud RAN

5G-verkot ovat osoittautuneet pienemmäksi tai suuremmaksi pettymykseksi sekä kuluttajien että teleoperaattorien näkökulmasta [24; 25]. Kuluttajat ovat pettyneitä liiallisiin lupauksiin, ja operaattorit ovat pettyneitä verkkojen kalliiseen hintaan. Varsinkin hinnan korkeus on hidastanut 5G-verkkojen rakentamista ja käyttöönottoa. Verkkojen pieni saatavuusalue taas turhauttaa kuluttajia ennestään.

5G on lähestymässä jo elinkaarensa puoltaväliä, mutta sen kantama on silti valtaosassa maailmasta 4G-verkkoja huonompi. Mobiiliverkko on melko hyödytön, jos sen kattavuudessa on aukkoja. 4G-verkot myös pärjäävät monissa tavantomaisissa tehtävissä vielä tänäkin päivänä todella hyvin, joka alentaa painetta päivittää näitä verkkoja 5G:hen.

5G:n suurin vahvuus on myös sen isoin ongelma; korkeampi taajuusalue sallii nopeamman tiedonkulun ja pienemmän latenssin, mutta tekee myös kantamasta pienemmän. Pienempi kantama vaatii enemmän tukiasemia, joiden pitää olla tehokkaampia, jotta ne pystyvät käsittelemään suuremman määrän dataa. Monille tämä tulee liian kalliiksi verrattuna 5G:n koettuihin hyötyihin.

5G:n hidas käyttöönotto on myös johtanut isoihin irtisanomisiin varsinkin Ericssonilla ja Nokialla, joissa molemmissa syyksi näihin on annettu markkinaolosuhteisiin ja kysyntään sopeutuminen [26; 27]. Paine 5G-verkkojen hinnan laskemiseen on siis korkea.

Vastoinkäymisistä huolimatta teleoperaattorit ja verkkojen valmistuttajat kuitenkin uskovat yhä 5G:hen ja sen teknologiaan. Haasteena on vain saada sen hinta laskemaan riittävästi, joka onkin Cloud RAN:in päätavoite.

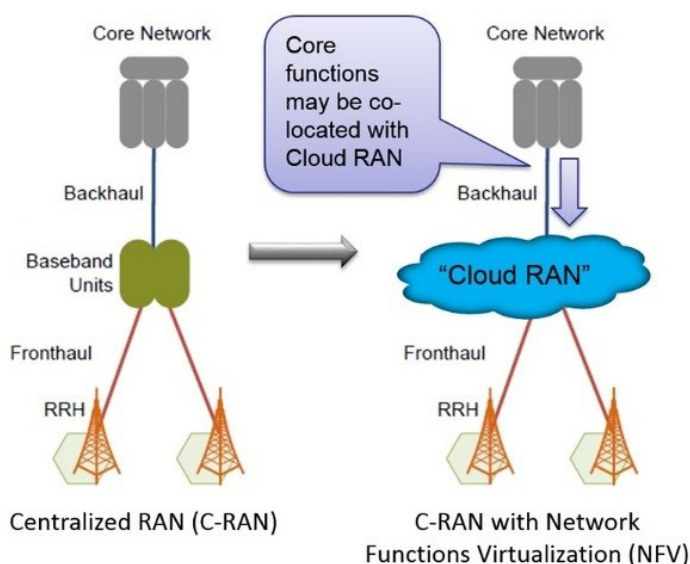
Cloud RAN on sekä tuote että arkkitehtuuri. Ericsson ja Nokia molemmat kutsuvat omaa toteutustaan Cloud RAN:iksi, kun taas Samsung myy verkkoratkaisuun nimellä vRAN (virtualized RAN). Kuitenkin pilvitekniikat ja Open RAN

ovat kaikilla valmistajilla keskeiset elementit, ja arkkitehtuuri noudattaa samoja pääpiirteitä.

3.1 Cloud RAN -arkkitehtuuri

Cloud RAN:in kunnianhimoinen tavoite on samalla avata 5G:n radioliityntäverkkojen rajapinnat Open RAN:in mukaisesti ja laskea sen hintaa viemällä radioliityntäverkon prosessointiyksiköt pilveen. Molemmat näistä tavoitteista kulkevat käsi kädessä. Avoimet rajapinnat mahdollistavat suuremman valikoiman laitteiston hankinnassa. Valmistajien ei myöskään enää tarvitse tarjota päästä päähän -ratkaisua radioliityntäverkolle, vaan pilvilaitteiston tuottajat kuten Dell ja HPE voivat tulla mukaan tarjoamaan yksittäisiä elementtejä tai komponentteja, jotka voidaan saumattomasti liittää esimerkiksi Nokian tai Ericssonin valmistamiin radioihin.

Cloud RAN:in korkeimman tason arkkitehtuuri näytetään kuvassa 6. ”Pilvi” siis tuodaan täyttämään entisen BBU:n eli radioliityntäverkon prosessointiyksikön tehtävät. Radiot ja ydinverkko tulevat pysymään samanlaisina kuin klassisessa 5G:ssä.



Kuva 6. Cloud RAN:in kehitys keskittyy entiseen BBU:hun. Radiot ja ydinverkko toimivat samoin kuin klassisessa 5G-radioliityntäverkossa. [28.]

Avoimet rajapinnat ovat kuitenkin vain ensimmäinen askel hintojen laskuun. Cloud RAN nimensä mukaan pyrkii viemään radioliityntäverkon tukiaseman pilveen. Merkittävimmin tämä tarkoittaa virtualisointia; tukiasemaksi pitäisi voida ottaa käyttöön mikä tahansa suorituskykyvaatimukset täyttävä palvelin. Sen resursseja pitäisi myös voida skaalata pienemmäksi tai suuremmaksi tarpeen mukaisesti.

Perinteiset BBU:t ovat varta vasten tarkoitukselleen rakennettu, joka tekee niiden ohjelmistokehityksen siirtämisestä yleiselle laitteistolle haasteellista. Suorituskykykin ainakin alkuvaiheessa tulee lievästi kärsimään. Näiden haasteiden ei pitäisi kuitenkaan olla niin merkittäviä, että ne olisivat asiakkaan huomattavissa. Cloud RAN on vielä uusi hanke, ja tällä hetkellä sen tavoite on saavuttaa yhdenvertaisuus klassisen 5G-radioliityntäverkon suorituskyvyn ja toiminnallisuuksien kanssa.

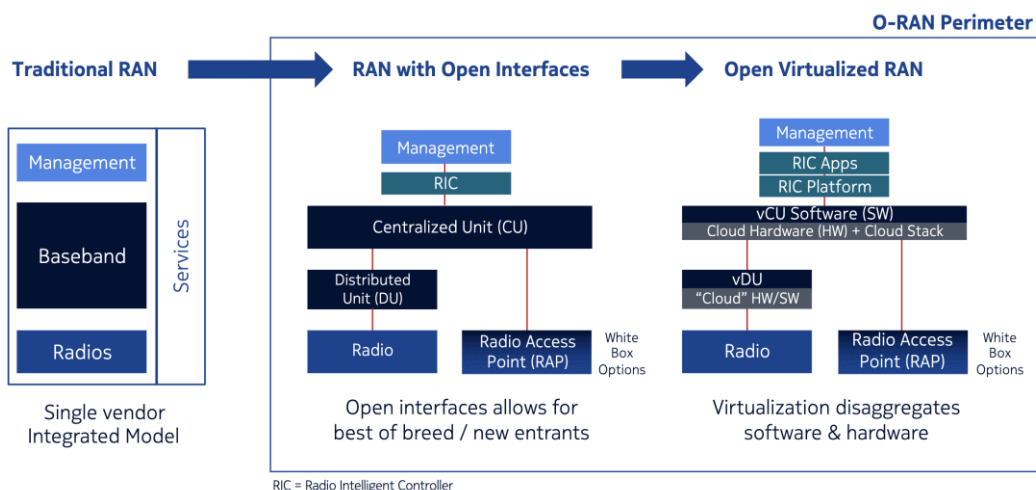
3.2 Tukiaseman pilkkominen kahteen

Virtualisointi sallii myös arkkitehtuurillisia muutoksia radioliityntäverkossa. Ennen tukiasema oli aina yksi fyysinen laite eli BBU, ja eri käyttötapauksia ja suorituskykyvaatimuksia varten jouduttiin rakentamaan uusi näille vaatimuksille tarkoitettu BBU. Cloud RAN:issa taas monta virtualisoitua tukiasemaa voidaan sijoittaa samaan fyysiseen palvelimeen, ja merkittävimmin entisen BBU:n toiminnallisuuden suorittavat laitteet voidaan hajauttaa moneen eri paikkaan ja palvelimeen. Perinteinen BBU on pilkottu kahteen, keskitettyyn (Centralized) ja hajautettuun (Distributed) yksikköön eli CU:hun ja DU:hun.

Tukiaseman varsinainen toiminnallisuus ei enää ole laiteriippuvainen, vaan tukiasema on enää ohjelmisto, jonka nimi on nyt Cloud Network Function (CNF). Nämä ohjelmistot on suunniteltu ajettavaksi eri sijainneissa toisistaan, joka mahdollistaa entisen tukiaseman vähemmän aikakriittisten tehtävien suorittamisen isommissa datakeskuksissa CU-yksikössä. DU tulee jäämään samaan paikkaan, missä perinteinen BBU on ennen toiminut.

Kuvassa 7 näkyy perinteisen tukiasema-arkkitehtuurin kehitys klassisesta 5G:stä Cloud RAN:iin. Vasemman kuvan BBU on Open RAN:issa pilkottu DU:hun ja CU:hun. Oikea kuva taas on varsinainen Cloud RAN, jossa DU ja CU ovat vielä lisäksi virtualisoituja.

O-RAN disaggregates the whole RAN architecture



Kuva 7. 5G:n tukiasema-arkkitehtuurit. [29.]

Tukiaseman pilkkominen tuo myös uuden potentiaalisen suorituskykyparannukselle. Perinteinen BBU ja myös Cloud RAN:in DU saavat olla korkeintaan muutamien kilometrien päässä radiosta latenssin takia, mutta CU voi olla monien kymmenien kilometrien matkan päässä DU:sta. CU:t voidaan tämän myötä sijoittaa pois kentältä isoihin tai keskikokoisiin datakeskuksiin, joissa niiden huolto ja ylläpito on halvempaa. Näitä datakeskuksia kutsutaan Edge- tai Far Edge -pilviksi.

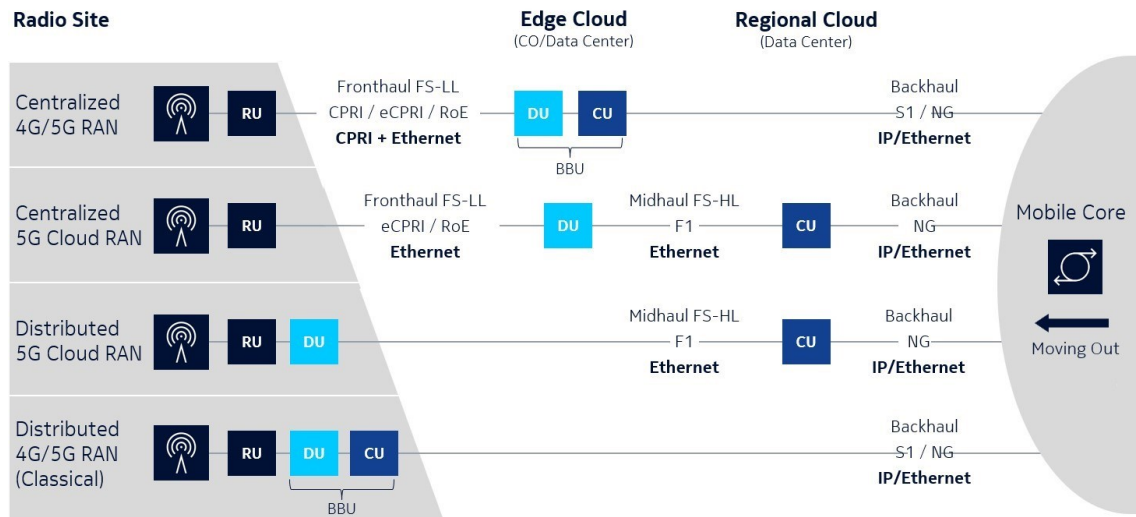
Koska CU:t sijaitsevat pilvessä, ne voivat myös tuoda uutta suorituskykyä tukiasemaan, mitä perinteinen BBU ei pystynyt tarjoamaan. CU voi mm. tallentaa suosittuja verkkosivuja tai muuta dataa omaan välimuistiinsa. Matka ydinverkkoon voi olla jopa satoja kilometrejä, ja sen kulkemiselta välttyminen on helpoin ja tehokkain tapa laskea verkon latenssia.

Päätelaitteen, kuten puhelimen luovutus tukiasemalta toiselle on myös pitkään ollut suuri haaste radioliityntäverkoissa. Mobiiliverkon fyysinen kantama on jaettu soluihin, joita yhdellä tukiasemalla on useita. Ne ovat yleensä parin neliökilometrin kokoisia alueita, joissa signaali kulkee saman radion kautta. Kulkeminen solujen välillä vaatii päätelaitteen luovutuksen, jolloin yhteys pitää hetkellisesti katkaista.

Jos radiot ovat kytkettynä samaan tukiasemaan, vaihto on nopeaa eikä siitä pitäisi syntyä havaittavaa katkoa. Tukiasemien väliset luovutukset kuitenkin joutuvat kulkemaan klassisessa 5G:ssä ydinverkon kautta, joka voi olla satojen kilometrien päässä. Pitkän matkan aiheuttama viive tekee luovutuksesta vaikeamman ja nostaa riskiä, että loppukäyttäjä huomaisi siitä aiheutuvan katkon.

Cloud RAN:issa taas yksi CU voi hallita montaa DU:ta, joka tekee kommunikatiosta DU:iden välillä nopeampaa. Päätelaitteen luovutus ei siis välttämättä vaadi enää signaalin kulkua ydinverkon kautta. Jos DU:t ovat saman CU:n alaisia, tämä voidaan hoitaa CU:n sisällä.

Yhdistämällä uuden tukiasema-arkkitehtuurin virtualisoinnin kanssa, yksi palvelin voi pitää sisällään monia CU:ita tai DU:ita. Perinteiset BBU-konfiguraatiotkin ovat helppoja toteuttaa; molemmat yksiköt pitää vain asentaa samalle palvelimelle. Kuvassa 8 näkyy erilaisia radioliityntäverkkojen tukiasemakonfiguraatioita. Samassa paikassa sijaitsevat DU ja CU vastaavat klassisen 5G:n BBU:ta. Tämä konfiguraatio on mahdollista myös Cloud RAN:issa, vaikkakin se on harvinaisempaa kuin erotettu DU ja CU. [30.]



Kuva 8. Erilaisia RAN-konfiguraatioita. Samassa paikassa sijaitsevat DU ja CU muodostavat klassisen 5G:n BBU:n. [31.]

Radioliityntäverkkoa pyritään siis niin paljon kuin mahdollista siirtämään pois kentältä keskitettyihin datakeskuksiin, joissa laitteistoa on helpompaa huoltaa ja päivittää mittakaavaetujen myötä. Kapasiteetin nostaminen tai laskeminen muuttuvien tarpeiden mukaan on myös vaivattomampaa virtualisoinnin ansiosta.

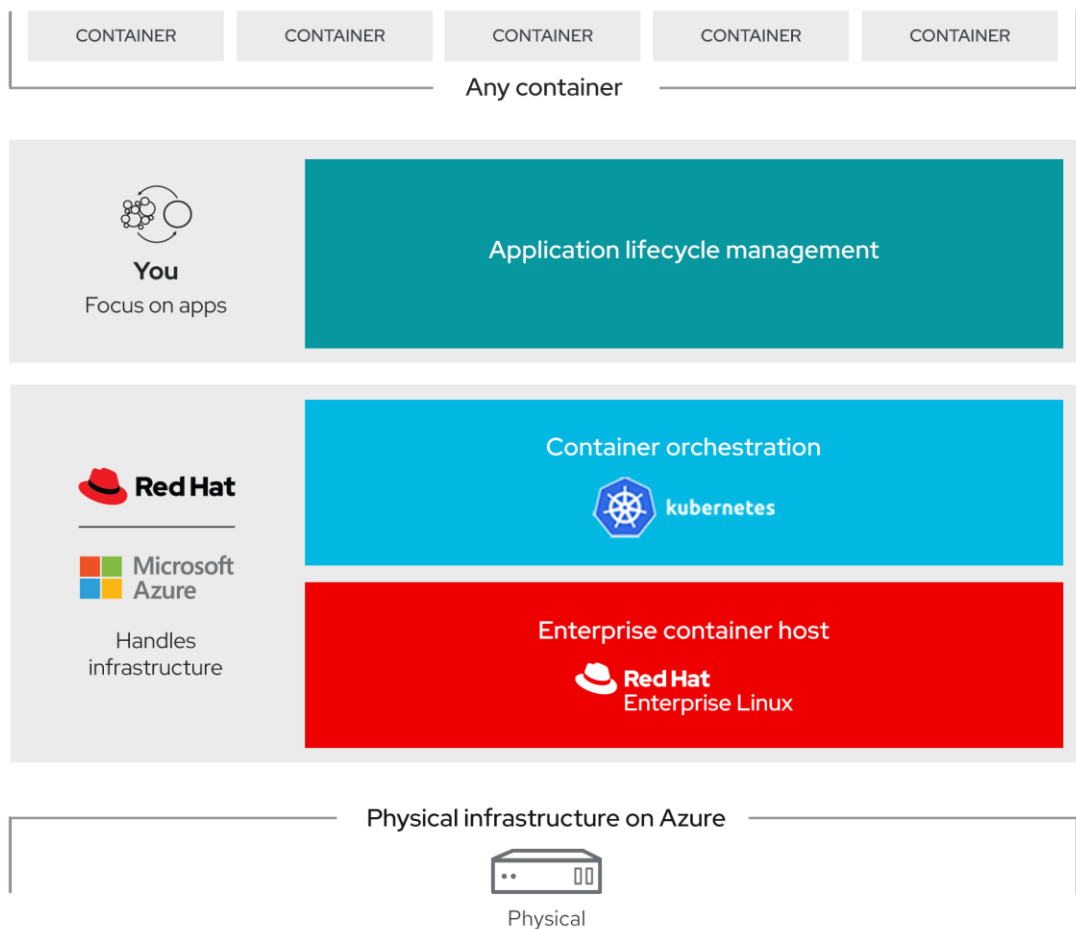
Resurssien keskittämiseksi on toki fyysiset rajoitteensa. Antennien pitää aina olla mahdollisimman lähellä loppukäyttäjää, ja samoin radioiden täytyy olla mahdollisimman lähellä antennia. Näissä virtualisointi ja keskittäminen ei ole mahdollista, jonka takia ne toimivat Cloud RAN:issa samoin kuin klassisessa 5G-radioliityntäverkossa.

3.3 Tukiaseman pilvi-infrastruktuurikerros

Pilviverkkofunktio eli Cloud Network Function on DU:n tai CU:n toiminnallisuuden tuova ohjelmisto. Se ei kuitenkaan sijaitse suoraan palvelinraudan päällä, vaan välissä on virtualisointikerros, joka mahdollistaa suuremman laitteistoyhteensopivuuden ja helpomman suorituskyvyn skaalauksen muuttuvien tarpeiden mukaan.

DU:n ja CU:n fyysisen laitteiston ja varsinaisen ohjelmiston eli verkkofunktion välissä olevaa kerrosta kutsutaan pilvi-infrastruktuuriksi. Pilvi-infrastruktuurille on monia toteutuksia ja arkkitehtuureja, mutta pääperiaate on, että sovellus elää omassa virtuaaliympäristössä, joita voi olla joko yksi tai useampi yhdessä fyysisessä palvelimessa. Nämä virtuaaliympäristöt voivat kommunikoida toistensa kanssa pilvi-infrastruktuurin tarjoamien rajapintojen avulla tai olemaan täysin suljettuja.

Pilvi-infrastruktuurin avulla tukiaseman virtuaalifunktiot voidaan asentaa lähes mihin tahansa. Sovelluksien ei myöskään tarvitse huolehtia ajureista tai ristiriitaisista riippuvuuksista muiden laitteelle asennettujen ohjelmistojen välillä. Suurimmat Cloud RAN:in pilvi-infrastruktuurin tarjoajat ovat Red Hat ja VMWare.



Kuva 9. Red Hat OCP asennettuna Microsoft Azure -pilvipalveluun. [32.]

Red Hatin ratkaisu on nimeltään OpenShift Container Platform. OCP on Kubernetes-pohjainen virtuaalikonttienhallintaympäristö, joka toimii Red Hat Linux -käyttöjärjestelmän päällä. Tässä ratkaisussa CNF asennetaan valittuun nimiavaruuteen, jossa CNF:n eri kontit sitten pyörittävät joko DU:ta tai CU:ta. Nokian Cloud RAN käyttää pääsääntöisesti OCP:ta, vaikka teleoperaattorit voivat myös päättää käyttää VMWarea tai muita pilvi-infrastruktuurintarjoajia omista verkoissaan.

Kuva 9 näyttää OCP:n korkean tason arkkitehtuurin. Mobiiliverkkojen tapauksessa fyysinen infrastruktuuri on DU:n tai CU:n sisältävä palvelin. Kuvan ylimmän kerroksen kontit sisältävät varsinaiset DU tai CU ohjelmistot eli funktiot. Erillinen verkonhallintajärjestelmä tarjoaa konteille elinkaarenhallinnan käyttäen OCP:n rajapintoja. Kuvan esimerkissä fyysinen palvelin sijaitsee Microsoft Azure -pilvipalvelussa, mutta käytännössä pilvipalveluntarjoaja voi olla kuka tahansa, tai teleoperaattori voi hallita laitteistoa ja sen ohjelmistoinfrastruktuuria itse omista datakeskuksissaan.

OCP:ta voi siis ajatella palvelimen käyttöjärjestelmänä, samoin kuin Windows on monilla kotitietokoneilla. Kontit taas ovat yksittäisiä sovelluksia, jotka voivat muodostaa suuremman kokonaisuuden asentamalla ne samaan nimiavaruuteen. Jokaisella CU- tai DU-pilviverkkofunktiolla on tyypillisesti oma nimiavaruutensa, joka sisältää useita kontteja. Kapasiteettia voidaan säätää muuttamalla eri toiminnallisuuksien tarjoamien konttien lukumäärää.

Nokia on läheisessä yhteistyössä Red Hatin kanssa kehittämässä OCP-versioita, jotka ovat soveltuvia mobiiliverkkojen maailmaan, missä korkea saatavuus ja järjestelmän vakaus ovat vielä tärkeämpiä kuin tavallisissa pilvipalveluissa [33].

3.4 Verkonhallintajärjestelmät

Koska radioliityntäverkko koostuu erittäin monista hajautetuista elementeistä, niiden luotettava etähallinta on hyvin tärkeää. Verkonhallintajärjestelmät ovat ohjelmistoja, joihin kaikki verkon elementit on sitä varten kerätty. Kaikkien elementtien konfiguraatio- ja käyttödata on siellä nähtävissä ja hallittavissa. Elementtien ohjelmistoja voidaan myös asentaa tai päivittää verkonhallintajärjestelmän kautta.

Perinteisesti verkonhallintajärjestelmä on ollut yhteensopiva vain sen kehittäjän omien tuotteiden kanssa. Koska Cloud RAN:in on tarkoitus olla avoin ja yhteensopiva valmistajien välillä, verkonhallintajärjestelmät, jotka ovat jokaisella valmistajalla olleet erilaiset ja epäyhteensopivat vaativat nyt joko päivittämistä tai kokonaan uudelleenlaatimista.

Nokialla yritettiin ensiksi luoda kokonaan uusi verkonhallintajärjestelmä nimeltä Network Operations Master (NOM), mutta asiakkaiden toiveesta projekti lakkautettiin ja tilalle on tuotu jo 2G-ajalta tuttu verkonhallintajärjestelmä MantaRay [34; 35]. MantaRayn tehtävä on tarjota täyskattava elinkaarenhallinta kaikille Nokian Cloud RAN -elementeille, ja lopulta onnistumaan samassa vielä kaikkien muidenkin valmistajien Cloud RAN- ja Open RAN -tuotteissa. Miten hyvin se tulee onnistumaan pilveen siirtymisessä jää vielä nähtäväksi. [35.]

3.5 Nokian Cloud RAN:in konfiguraatiot

Cloud RAN -arkkitehtuurin pääelementit ovat radio eli RU, DU ja CU. Nokialla näiden lisäksi on myös yksi ylimääräinen elementti radion ja DU:n välissä, Fronthaul Gateway eli FHGW. FHGW sijaitsee lähellä DU:ta, usein jopa samassa palvelinkaapissa.

FHGW on pääasiallisesti verkkokytkin, joka on halpa ratkaisu kytkeä useita radioita yhteen DU:hun. Jotkut vanhemmat radiomallit myös välittävät signaalinsa

CPRI (Common Public Radio Interface) -muodossa, joka oli vallitseva standardi mobiiliverkoissa ennen Open RAN:ia ja 5G:tä.

Cloud RAN kuitenkin vaatii radiosignaalin välittämisen päivitetyssä eCPRI (enhanced CPRI) -muodossa. FHGW on vaadittu radiosignaalin muuntaja tapauksissa, joissa radio ei tue eCPRI:ä. Kaikki asiakaskonfiguraatiot eivät kuitenkaan käytä FHGW:tä, ja jos eCPRI-muunnosta ei tarvita, tavallisemmatkin verkkokytkimet toimivat yhdistämään radiot DU:hun. FHGW-palvelin esiintyy kuvassa 10.



Kuva 10. Nokia AirFrame Fronthaul Gateway eli FHGW. Yleensä se sijaitsee samassa palvelinkehikossa DU:n kanssa. [36.]

Toinen ja eniten kiistaa aiheuttanut konfiguraatioero Nokian Cloud RAN:issa kilpailijoihin verrattuna on SmartNIC-verkkokiihdytinkortti. Nokian ratkaisussa DU:n keskusprosessori voi olla tavallinen palvelinprosessori, koska kaikki erityislaitteistoa vaativa toiminnallisuus hoidetaan SmartNIC-kortissa. Keskusprosessori voi siis olla eri valmistajien, kuten Intelin tai AMD:n kehittämä, tai jopa pohjautua eri prosessoriarkkitehtuuriin kuin tyyppillinen x86-64. Nokia on tehnyt tuotteellaan kokeita myös ARM-arkkitehtuurin prosessoreilla, joita käytetään eniten puhelimissa ja muissa alhaista virrankulutusta vaativissa laitteissa [37]. Ericsson ja Samsung taas ovat päätyneet Intelin valmistamaan erikoisprosessoriin, joka kykenee hoitamaan samat asiat ilman SmartNIC-korttia.

Molemmilla lähestymistavoilla on hyvät ja huonot puolensa. Inteliin lukkiutumisen voidaan katsoa olevan Open RAN:in aatteen vastainen ratkaisu, samoin kuin Nokian valmistaman SmartNIC-kortin vaatiminen. Mobiilitukiasema

kuitenkin vaatii toiminnallisuuksia, jota tavanomainen pilvilaitteisto ei voi tarjota, jonka takia jotain on muutettava. Asiakkaat tulevat toimimaan tässä lopullisina tuomareina, mutta se ei ole estänyt suurien kiistojen syntymistä aiheesta varsinkin Nokian ja Ericssonin välillä. [38.]

4 Nokia Cloud RAN:in järjestelmättestaus

Järjestelmättestaus (system testing) tarkoittaa koko tuotteen testausta yhtenä kokonaisuutena. Järjestelmättestaus on läheinen käsite päästä päähän -testaukselle, ja usein nämä sekoittuvatkin keskenään. Pieniä eroja niissä kuitenkin on; päästä päähän -testeissä testataan usein oikeita käyttötapauksia käyttäen koko järjestelmää, kun taas järjestelmättestaus keskittyy enemmän tietyn toiminnallisuuden vahvistamiseen. Järjestelmättestit voivat siis olla tai olla olematta päästä päähän -testejä, mikä riippuu siitä, kuinka montaa järjestelmän komponenttia testitapaus vaatii. Molemmissa testimeteodeissa tarvitaan kuitenkin kokonainen järjestelmä ilman, että sen epäolennaisiakaan elementtejä olisi jätetty pois tai korvattu simulaattoreilla.

Integraatiotestaus eli järjestelmän komponenttien yhteistoimivuuden testaus on myös hyvin läheinen käsite järjestelmättestaukselle, mutta tyypillisesti tällaiset testit tehdään ilman täydellistä testiympäristöä ennen varsinaista järjestelmättestausta. Järjestelmättestaus on ns. mustan laatikon testausta, eli ohjelman lähdekoodi ei näissä testeissä ole saatavilla, vaan järjestelmää lähestytään asiakkaan näkökulmasta. [39.]

Nokialla korkean tason testit on jaettu ST- (System Testing) ja ET (Entity Testing) -osaamisalueisiin, jonka takia käytännössä ST hoitaa myös päästä päähän -testejä samalla kuin järjestelmättestejä. Valtaosassa testitapauksissa alku- ja lopputilanteen tulee olla toimiva verkkoyhteys testiympäristössä, mikä vaatii koko järjestelmän toimivuuden.

Nokia Cloud RAN:in järjestelmättestaus siis tarkoittaa testien ajoa kokonaisella radioliityntäverkolla. Minimivaatimus jokaiselle testiympäristölle on CU, DU ja

radio. Lisäksi jonkinlainen kytkin, joka on useimmiten Nokian FHGW, on oltava hoitamassa DU:n ja radion välistä yhteyttä. Vielä ympäristön toimivuuden vahvistamiseksi tarvitaan yksi tai useampi antenni, päätelaite, sekä yhteys ydinverkkoon.

Kun tällainen testiympäristö on rakennettu, sen toiminnallisuus voidaan vahvistaa tekemällä radioliityntäverkkoon yhteydessä olevalla päätelaitteella datapuhelu, jonka on pystyttävä saamaan yhteys ydinverkkoon ja sen kautta internetiin. Kaikissa testitapauksissa verkon toiminta ei toki ole oleellista, mutta se on helppo ja nopea tapa vahvistaa koko järjestelmän toiminta, jonka takia se on tavanomaisin tapa aloittaa ja lopettaa testiajot.

Suurin osa järjestelmätesteistä tehdään laboratorioissa ja datakeskuksissa, joissa yksi testilinja sijaitsee yleensä yhdessä tai useammassa palvelinkaapissa. Kuvan 11 vasemmalla näkyy yksi Nokian tavanomaisista palvelinkaapeista, jossa voi hyvin olla useita CU:ita. Kuvan oikealla taas on Nokia OpenEdge -palvelinkehikko, joka voidaan asentaa samankaltaiseen kaappiin. Kuvan OpenEdge-kehikkoon on asennettu neljä DU-palvelinta sekä yksi FHGW.



Kuva 11. Oikealla Nokia AirFrame Rackmount -palvelinkaappi, vasemmalla Nokia AirFrame OpenEdge -palvelinkehikko. [40; 41.]

Varsinaisia kenttätestejä laboratorioden ulkopuolillakin tehdään, mutta näillä testataan lähinnä järjestelmän osien fyysistä luotettavuutta ja toimivuutta, ja ohjelmistokerrokseen keskittyvät järjestelmätестit tehdään aina laboratorioissa. Laboratoriotesteissä etäisyyksiä voidaan simuloida laskemalla antenniin lähettämän signaalin vahvuutta vaimentimilla. Tällä keinolla voidaan helposti testata esimerkiksi päätelaitteen luovutusta toiselle solulle, vaikka mitään ei fyysisesti liikutettaisi.

Järjestelmätestauksen lisäksi toinen merkittävä ylemmän tason testausmenetelmä Nokia Cloud RAN:issa on entiteettitestaus (entity testing). Siinä testataan vain yhtä radioliityntäverkon komponenteista, kuten radiota, DU:ta tai verkonhallintajärjestelmää. Koska entiteettitestit vaativat pienemmän ympäristön ja pitävät sisällään vähemmän liikkuvia osia, ne järkevä suorittaa ennen järjestelmätestejä. Entiteettitesteissä löydetty virheet on helpompi diagnosoida kuin järjestelmätesteissä, ja ne ovat myös sekä ajallisesti että rahallisesti halvempia suorittaa. Järjestelmätestitapaukset ovat siis paljon valikoidumpia kuin entiteettitestitapaukset.

4.1 Järjestelmätestien kulku

Järjestelmätestit suoritetaan pääasiallisesti ensimmäisellä kertaa manuaalisesti. Ne ovat hyvin laitteistoriippuvaisia, eikä niiden automaatiolla aina edes ole suurta käytännöllistä hyötyä, koska järjestelmätestit ajetaan tyypillisesti vain kerran vahvistamaan toiminnallisuus, ennen kuin se toimitetaan asiakkaalle.

Pääsääntöisesti kaikki järjestelmätestit alkavat järjestelmän toiminnan varmistamisesta. Tähän riittää yleensä datapuhelun soittaminen testiympäristön verkon kautta. Lopputila testeissä pitäisi olla sama kuin alkutila, eli saman puhelun pitää toimia myös silloin. Poikkeuksena tässä on mm. elinkaaritestit, joissa testataan esimerkiksi CU:n tai DU:n ohjelmiston asennusta. Silloin verkko ei tietenkään testin alkutilassa voi toimia.

Kaikki järjestelmätestitapaukset on määritetty tietyn toiminnallisuuden tarjoamassa ominaisuudessa (eng. feature). Testitapaukset luodaan yhdessä kehittäjien ja testaajien kanssa. Tällä vältetään tilanteita, joissa testi ei tarpeeksi kattavasti vahvista toiminnallisuutta ja toisaalta tapauksia, joissa testi ei ole käytännössä toteutettavissa.

Vaaditun testiympäristön määrittäminen on erittäin tärkeää; ympäristöjen rakentaminen on työlästä ja laitteiston hankinta kallista. Sen takia testien ympäristövaatimukset eivät saa olla turhaan liian tarkkoja. Toisaalta on paljon testejä, jotka välttämättä vaativat tietyn ympäristökonfiguraation. Esimerkiksi Dell- tai HPE-palvelimen yhteensopivuus ja toimivuus DU:na vaatii DU:n testaamista tämän valmistajan laitteistolla. Siihen ei ole oikotietä, vaan tällainen ympäristö täytyy rakentaa.

4.2 Järjestelmätestien kategoriat

Joitakin erityisen tärkeäksi todettuja tai helposti suoritettavia testejä ajetaan myös säännöllisin väliajoin. Nokialla käytettävyys- ja suorituskykytestit ajetaan noin kolme kertaa vuodessa, eli aina kun Cloud RAN:ille ollaan tekemässä uusi pääjulkaisu asiakkaille. Samankaltaisesti on myös regressiotestejä, joilla vahvistetaan, että toiminnallisuus ei ole rikkoutunut uusimmissa päivityksissä. Nämä testit ajetaan useammin, pääsääntöisesti kerran kahdessa viikossa. Käytettävyys-, suorituskyky- sekä regressiotestit ovat erinomaisia kandidaatteja testiautomaatiolle, koska ne eivät muutu ja ne pitää ajaa samalla tavalla samoissa ympäristöissä säännöllisin väliajoin.

Regression ja suorituskykytestien lisäksi Nokia suorittaa asiakkaan toiveesta asiakastoimituksen regressiotestejä (Customer Delivery Regression Testing eli CDRT). Nämä testit ovat samankaltaisia normaalien regressiotestien kanssa. CDRT testit suoritetaan ennen kuin ohjelmisto julkaistaan eli toimitetaan asiakkaalle. Suoritettavat testit määräytyvät asiakkaan konfiguraation mukaisesti. CDRT on viimeinen askel vahvistamaan, että asiakkaalle toimitettava

ohjelmisto- ja laitteistokonfiguraatio toimii nimenomaan heidän käyttötapauksensa.

Suorituskykytestit pyritään myös tekemään mahdollisimman isolla konfiguraatiolla, jossa DU:ita voi olla jopa sata yhtä CU:ta kohti, ja solujen kokonaismäärä voi reilusti ylittää tuhannen. Solut ovat tyypillisesti noin yhden neliökilometrin kokoisia alueita, mutta tiheästi asutuissa paikoissa ne voivat olla paljon pienempiä. Suorituskykytestissä on erityisen tärkeää vahvistaa toimivuus ja tehokkuus tällaisissa ääritapauksissa.

Näin ison konfiguraation todellinen testaus on kuitenkin käytännössä mahdotonta todellisen asiakkaan verkon ulkopuolella, jonka takia ylimääräisten elementtien luomiseen käytetään simulaattoria. Simulaattorin käyttö testeissä ei kuitenkaan ole normaalia, eikä sitä koskaan käytetä täysin korvaamaan fyysistä testiympäristöä. Simulaattoria käytetään vain ja ainoastaan laajentamaan olemassa olevaa kapasiteettia, eikä luomaan sellaista tyhjästä.

5 Nokia Cloud RAN:in järjestelmätestien automaatiotyökalut

Cloud RAN:in järjestelmätestiautomaatio pyrkii samaan lähestymistapaan testien suorituksessa kuin tavanomaiset manuaalisesti ajettavat testit. Testien vaatimukset ja suoritusaskeleet ovat molemmissa samat, ja käytännössä testit automatisoidaan vasta, kun ne on saatu manuaalisesti ajettua ja ollaan varmoja, että kyseinen vaatimus on toteutettu ja toimiva. Testiautomaatiota käytetään lähinnä regressiossa sekä muissa testeissä, jotka on ajettava usein sekä säännöllisin väliajoin. Joskus paljon aikaa ja työtä vieviä testejä automatisoidaan myös valmistautuessa asiakastoimituksen regressiotestijoihin, koska näissä tapahtumissa on usein hyvin tiukat aikarajat kaikkien testien suorittamiseen.

Testiautomaation päätyökalu Nokialla on Basic Flexible Automatic Test eli BFAT. Se on Robot Framework -testien kehitykseen tarkoitettu verkkosovellus, jolla voidaan sekä ajaa että kirjoittaa testitapauksia. BFAT on myös hyvin

modulaarinen, ja siihen voidaan liittää paljon komponentteja järjestelmän eri elementtien hallintaan, vianmääritykseen sekä lopputuloksien raportointiin.

Päätelaitetta voidaan etähallinta UltraCaller-sovelluksella, antennien signaalia voidaan etäohjata käyttäen vaimentimien valmistajien rajapintoja. Suurin osa BFAT:issa käytetyistä toiminnallisuuksista Cloud RAN:in ja muidenkin järjestelmien testauksessa tuodaan kuitenkin Nokian Test Automation Framework (TAF) -kirjastoista. TAF-kirjastot ovat eri radioliityntäverkon elementtien testausta varten kirjoitettuja Python-kirjastoja.

Lähes kaikilla Cloud RAN:in ja klassisen 5G RAN:in elementeillä on oma TAF-kirjastonsa. Eri elementtien TAF-kirjastot voivat käyttää sisällään joko verkkopohjaisia REST-rajapintoja tai komentorivityökaluja riippuen testattavasta elementistä. Näitä Pythonilla kirjoitettuja funktioita kutsutaan sitten tavallisesti Robot Framework -pohjaisissa BFAT-testeissä. Puhtaalla Pythonillakin testien kirjoittaminen on mahdollista, mutta tätä tyypillisesti vältetään. Nokialla varsinaisten testien kirjoittamiseen pyritään aina käyttämään Robot Framework -testikehystä.

5.1 Robot Framework testikehyksenä

Robot Framework on hyväksymis- ja muille korkean tason testeille rakennettu testiautomaatiokehys. Hyväksymistestit ovat järjestelmätesteille läheinen korkean tason testimenetelmä, joilla vahvistetaan järjestelmän toimivuus ennen sen toimitusta asiakkaalle. Robot Frameworkia voidaan kuitenkin käyttää hyväksymistestien lisäksi mm. ohjelmistorobotiikassa (Robotic Process Automation) ja Cloud RAN:in kannalta merkittävämminkin, järjestelmätestauksessa. Robot Frameworkin perussyntaksi on esitetty kuvassa 12.

```
*** Test Cases ***  
  
Welcome Page Should Be Visible After Successful Login  
    Open Browser To Login Page  
    Enter Username  
    Enter Password  
    Submit Login Form  
    Verify That Welcome Page Is Visible
```

Kuva 12. Esimerkki Robot-testi. Punainen pääotsikko on testin nimi, ja sen alla on joko käyttäjän omia tai ulkoisesta kirjastosta tuotuja keywordeja. [42.]

Robot Framework sai alkunsa jo vuonna 2005, kun silloin Nokialla työskentelevä Pekka Klärck suunnitteli diplomityössään “Data-Driven and Keyword-Driven Test Automation Frameworks” testiautomaatiokehityksen, josta lopulta syntyi Robot Framework. Testikehityksen lisenssi ja lähdekoodi vapautettiin vuonna 2008, jonka jälkeen se on ollut Robot Framework Foundationin huoltama. Nokia on kuitenkin edelleen suuri Robotin tukija, ja monet Robotin suosituimmista kirjastoista on vieläkin Nokian kehittämiä. [43; 44.]

Robot Frameworkin datalla ohjautuva (Data-Driven) luonne tarkoittaa sitä, että varsinainen testin runko erotetaan sen syötöistä ja odotetuista tuloksista. Tämä data sijaitsee ulkoisessa tiedostossa, joka mahdollistaa monen testin käyttävän samaa datalähdettä. Tämä vähentää testeissä tapahtuvaa toistoa ja tekee tarvittaessa myös refaktoroinnista helpompaa. Tämä on erityisen tärkeää järjestelmätesteissä, joissa ympäristöjen väliset erot tekevät testien siirtämisestä uuteen ympäristöön usein hyvin haasteellista.

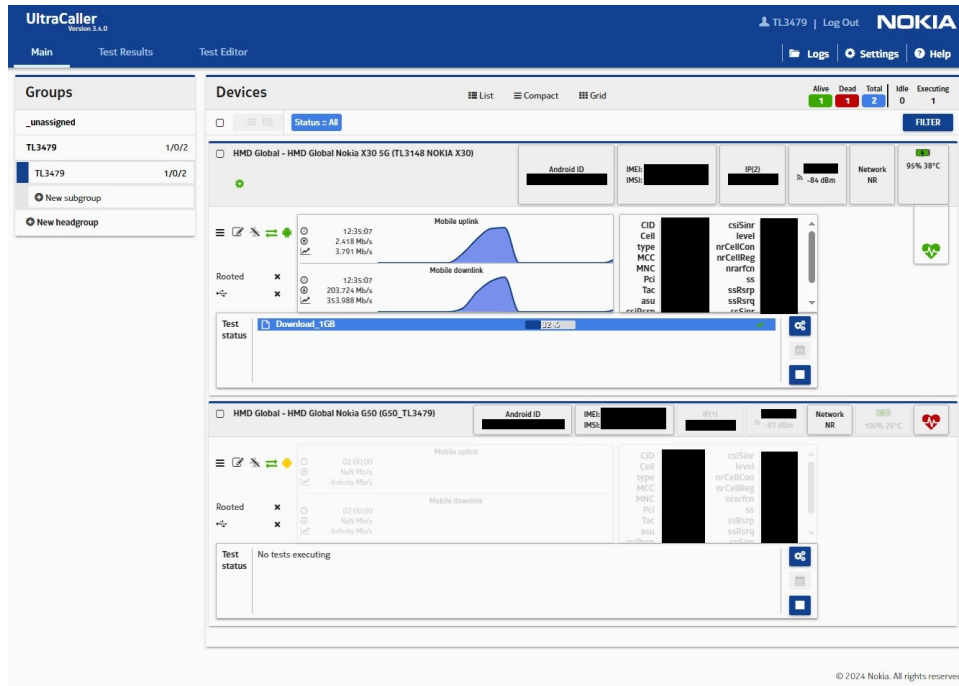
Keyword-driven eli avainsanoilla ohjautuminen taas tarkoittaa yksinkertaisesti sitä, että funktiot eli keywordit ohjaavat testin ajoa ja että niiden toteutukset sijaitsevat varsinaisen testin ulkopuolella, yleensä pienemmissä resurssitiedostoissa tai suuremmissa kirjastoissa. Keywordeihin voidaan sitten kerätä käyttäjän näkökulmasta yksinkertainen toiminto, kuten ”Syötä käyttäjätunnus” yhteen

selkeään ja kutsuttavaan funktioon. Nämä funktiot voivat kuitenkin olla ohjelmallisesti yllättävän monimutkaisia, jonka takia näitä ei välttämättä kannata toteuttaa suoraan Robotilla. Robot Framework tarjoaa suoran tuen Pythonille, jolla Robot itsekin on kirjoitettu. Pythonin lisäksi muillakin kielillä, kuten Javalla tai C#:lla on mahdollista tehdä Robotin keywordeja.

Järjestelmätestit Cloud RAN:in kokoisessa tuotteessa ovat usein niin monimutkaisia ja monivaiheisia, että niiden täydellinen automaatio voi olla jopa mahdotonta. Robottia ei olla suunniteltu näin laajoihin käyttötapauksiin, mikä tekeekin siitä välillä rajoittavan tekijän testien luomisessa. Kuitenkin sen pinnallinen helpokäyttöisyys ja selkeä syntaksi auttaa myös testaajia, joilla ei ole tai ohjelmointitaitausta luomaan toimivia testejä, kunhan varsinaiset keywordit on toteutettu etukäteen.

5.2 UltraCaller päätelaitteiden etähallinnassa

UltraCaller on Nokian tuottama puhelinten etähallintasovellus. Se on luotu erityisesti testiautomaatioita varten, ja on hyvin integroitu BFAT-testikehykseen. UltraCaller on erittäin yksinkertainen asentaa ja käyttää. Ensiksi puhelimelle asennetaan joko Nokia Android Application (NAA) tai iOS-ympäristöissä UltraCaller-sovellus. Sitten tähän sovellukseen syötetään UltraCaller-webpalvelimen verkko-osoite ja käyttäjän nimi, jonka tilille puhelin ilmestyy UltraCallerin verkkosovelluksessa. Kuvassa 13 on UltraCallerin etusivu, jossa näkyy kaksi puhelinta. [45.]



Kuva 13. UltraCallerin etusivu.

UltraCallerissa voidaan sekä ajaa että myös luoda testejä. Radioliityntäverkkojen järjestelmätestauksessa puhelimen testitapaukset ovat tyypillisesti hyvin yksinkertaisia. Testit noudattavat samaa avainsanoilla ohjautumisen periaatetta kuin Robot Framework. Halutut keywordit otetaan testiin mukaan, ja ne suoritetaan joko UltraCallerin etusivulta tai BFAT:in kautta. [45.]

Monimutkaisemmatkin testit ovat kyllä UltraCallerissa mahdollisia, mutta tähän ei yleensä ole tarvetta. Puhelimista Cloud RAN:in järjestelmätestauksessa välitetään vain sen verran, että ne saavat yhteyden radioliityntäverkkoon ja näin vahvistavat sen toiminnan. UltraCallerin suurin etu on sen yhteensopivuus BFAT:in kanssa, jonka ansiosta yksinkertaiset puhelintestit voidaan liittää osaksi monimutkaisempia testikokonaisuuksia. [45.]

Tyypillisin tehtävä puhelimella on suorittaa datapuhelu käyttäen radioliityntäverkon yhteyttä. Tätä varten testiverkossa on yleensä joitain puhelinnumeroita, joita soittamalla voidaan testata esim. VoNR (Voice over New Radio) -toiminnallisuutta, eli normaalia puhelua, jossa ääni kulkee natiivisti 5G-verkon kautta.

Lisäksi UltraCaller-palvelimen verkkosivun kautta voidaan nopeasti tarkistaa verkon lataus- ja lähetysnopeudet. Nämä kaksi testiä, VoNR:in ja datayhteyden toiminnan ja suorituskyvyn tarkistus ovat oikeastaan kaikki, mitä radioliityntäverkon testaamiseen tarvitaan. Vikatilanteissa voidaan käyttää muita ohjelmistoja tarkistamaan verkkoyhteyden yksityiskohtaisia raportteja, mutta useimmiten näinkään pitkälle ei tarvitse mennä. [45.]

Puhelimet voivat olla yhteydessä UltraCalleriin joko langallisesti tai langattomasti. Langallisessa tapauksessa tarvitaan tietokone, johon on asennettu UltraCallerin tarjoama välityspalvelin. Sitten puhelin voidaan kytkeä USB:llä tietokoneeseen, jolloin yhteys UltraCallerin ja puhelimen välillä toimii, vaikka puhelin olisi muuten syystä tai toisesta poissa verkosta. Langattomassa tapauksessa tätä välipalvelinta ei käytetä, vaan puhelin ottaa suoraan yhteyden UltraCalleriin. [45.]

Langallinen yhteys on sillä tavalla suotavampaa ja luotettavampaa, että yhteys puhelimeen ei ole riippuvainen testattavan radioliityntäverkon toiminnasta. Langattomasti puhelimen etähallinta testiympäristön ollessa alhaalla on mahdotonta, joka on usein kiusallista. Puhelimen eliniän pidentämisen vuoksi ne on myös hyvä asettaa lentokonetilaa testien välissä, joka ei ole mahdollista langattomasti ohjatuissa puhelimissa. [45.]

Puhelinten ylikuumentuminen on ongelma ympäristöissä, joissa puhelin on samassa palvelinkaapissa palvelimien tai radioiden kanssa. Puhelinten täytyy tyyppillisesti olla eristetyissä ympäristöissä testiympäristön antennien kanssa, jotta puhelin ei ottaisi vahingossa yhteyttä väärään ympäristöön. Tilan puutteen vuoksi samaan radioeristettyyn kaappiin asennetaan usein antennien lisäksi varsinaiset radiot, jotka tuottavat paljon lämpöä. Lämpötilojen ei pitäisi koskaan kaapin sisälläkään nousta välittömästi vaaralliseksi, mutta ne kuluttavat puhelinten akkuja yllättävän nopeaa vauhtia, joka onkin niissä käytännössä aina ensimmäiseksi hajoava osa. [45.]

5.3 BFAT testien suorittajana

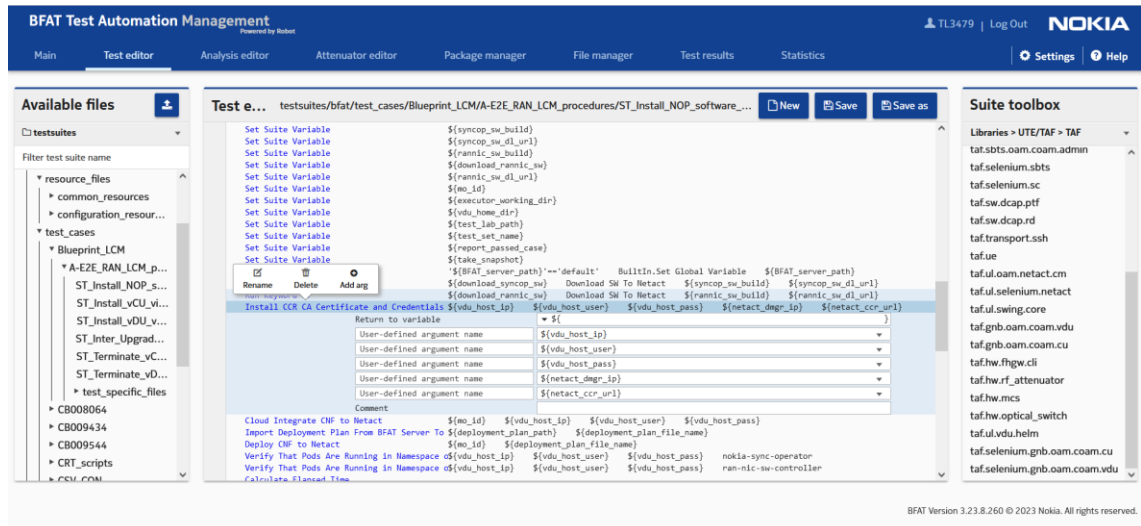
BFAT toimii Nokialla järjestelmätestiautomaation keskuselementtinä. Se on verkkosovellus, johon kaikki muut testien komponentit ja työkalut on liitetty. BFAT voi sitten toimia näiden komponenttien ohjaajana ja välittäjänä. [46.]

Ytimessään BFAT on Robot Frameworkin kehitysympäristö, kuten Visual Studio on C++ -kielelle tai Eclipse Javalle. Robot Framework ja Python ovat tietysti paljon kevyempiä kieliä, eivätkä Robot-testit yleensä kasva yli tuhatta riviä suuremmiksi. BFAT:in toiminnalliset vaatimukset ovat siis paljon kevyempiä kuin minäkään yleiskäyttöisen kielen ohjelmointiympäristön. Kuvassa Kuva 14 näkyy BFAT:in etusivu, jossa testiajo on käynnissä. [46.]

The screenshot displays the BFAT Test Automation Management web interface. The top navigation bar includes 'Main', 'Test editor', 'Analysis editor', 'Attenuator editor', 'Package manager', 'File manager', 'Test results', and 'Statistics'. The left sidebar shows a tree view with 'Workspace' (TL 3479), 'System Under Test' (SUT 3479), 'Automation environment' (CRT3479), 'Test set' (etu), and 'Executor'. The main content area is titled 'Executor' and shows the status of a test suite for 'TL 3479'. It includes a 'Remote server status' table with columns for server name and status (On/Off). The 'Test suite status' section shows a list of test cases with their execution status (Running, Passed, Failed). A 'Queue' table at the bottom shows the execution progress of the test suite.

Queue	0	TL3479	TL 3479	Execution - 40% (2 / 5)	Test - 25%
12:34:02	INFO	CU Pods Status Check			
12:33:58	INFO	OKI			
12:33:57	INFO	Check vCU has allowed alarms			
12:33:57	INFO	OKI			

Kuva 14. BFAT:n etusivu, jonka kautta automaatiotestit ajetaan.



Kuva 15. BFAT:in testieditori, jossa voi muokata vanhoja tai luoda uusia testejä.

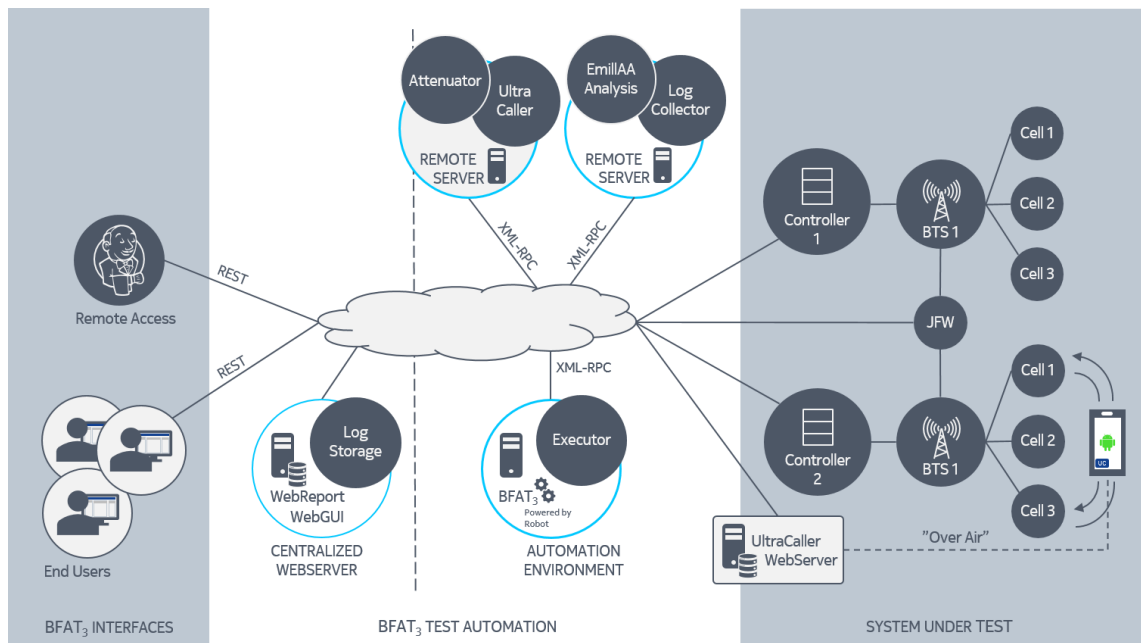
BFAT pitää sisällään myös testieditorin, jonka etusivu on kuvassa 15. Editorina se on erittäin yksinkertainen, ja toimii ns. ”raahaa ja pudota” -mallilla, jossa keywordeja valitaan oikealla olevasta työkalupalkista, ja ne asetetaan testissä haluttuun paikkaan. Keywordien argumentit täytetään samankaltaiseen tyyliin. Keywordit saadaan lähinnä Nokian TAF-kirjastojen kautta, jotka voidaan asentaa BFAT:in sisäisen pakettinhallintajärjestelmän kautta. Tällä pakettinhallintajärjestelmällä voidaan myös asentaa mitä tahansa muita Python-pakkauksia. [46.]

BFAT itsessään ei kuitenkaan pysty ajamaan käytännössä yhtäkään Cloud RAN:in järjestelmätestiä. Mukaan tarvitaan aina UltraCaller puhelimen hallintaan ja järjestelmän toiminnan vahvistamiseen, sekä eri TAF-kirjastoja riippuen testissä käytetyistä elementeistä. Lähes jokaisella Cloud RAN:in elementillä on oma TAF-kirjastonsa, joka tuo testeihin juuri sille elementille ominaisia toiminnallisuksia. [46.]

5.3.1 BFAT:in moduulit

Koska BFAT:ia ei käytetä vain Cloud RAN:in automaatiotesteihin, se on suunniteltu hyvin laajennettavaksi. BFAT on pääsääntöisesti tarkoitettu radioliityntäverkkojen testaukseen, mutta se on myös ulkoisille asiakkaille myytävä tuote.

BFAT:in moduulit myös pilkkovat sen toimintoja eri palveluihin, joita voidaan ajaa hajautettuina eri palvelimiin.



Kuva 16. BFAT:in yleisarkkitehtuuri. Varsinainen BFAT-palvelin on kuvassa pilvi, ja se ottaa yhteyttä ja hallitsee muita palveluita. [46.]

Kuten kuvassa 16 näkyy, BFAT:in korkean tason arkkitehtuuri on hyvin modulaarinen. Puhelimien ja vaimentimien ohjaamiseen, testiraporttien ja vikalokien tallentamiseen, sekä varsinaisen testikodin ajoon on ulkoisia komponentteja, joihin BFAT ottaa yhteyden ja ohjaa eri verkkoprotokollien avulla. Nämä palvelut eivät siis tyypillisesti sijaitse samassa palvelimessa kuin BFAT.

Kuvan oikealla puolella on taas varsinainen testiympäristö eli System Under Test. Testaaja pääsee käsiksi näihin kaikkiin elementteihin BFAT:in kautta. Tarvittaessa tietyt moduulit voidaan suorittaa myös BFAT:in sisällä, mutta tämä lisää BFAT-palvelimeen kohdistuvaa kuormitusta, jonka takia mahdollisimman paljon toimintoja pyritään ulkoistamaan. [46.]

Testin Python- tai Robot-koodin suorittava elementti eli Executor on yleensä myös erillinen BFAT:in etähallitsema tietokone. Tämänkin osan ulkoistamiselle on monia etuja; ulkopuolisten suorittajien uudelleenasennus vikatilanteissa on

paljon helpompaa kuin varsinaisen BFAT:in uudelleenasetus. Ne ovat myös usein nopeampia kuin varsinainen BFAT-palvelin, joka on usein kuormittuneempi, koska sillä voi olla useita samanaikaisia käyttäjiä. Suorittajat taas ovat yleensä liitetty tiettyyn testiympäristöön, eli ne ajavat aina enintään yhtä testiä kerrallaan. Käytännössä suorittajat ovat Linux-tietokoneita, joihin asennetaan BFAT:in Executor-ohjelmisto. [46.]

Vaimentimien hallinta etäisesti on myös hyvin tärkeää. Vaimentimien avulla voidaan tarkasti simuloida suuriakin etäisyyksiä, sekä järjestelmätestaukselle merkittävimmin puhelinten luovutusta yhdeltä tukiasemalta toiselle. BFAT:issa on vaimennineditori, jossa voidaan luoda testin aikana ajettavia skriptejä tähän tarkoitukseen. Vaimentimien valmistajilla on omat ohjelmistonsa tuotteidensa etähallintaan, joihin BFAT voi ottaa yhteyden. [46.]

5.3.2 System Under Test eli SUT

BFAT:in System Under Test eli SUT on testiajon ydin. Se on virtuaalinen mallinnus fyysisestä testiympäristöstä, joka sisältää kaikki ympäristön elementit sekä niiden hallintaan tarvittavat tiedot. SUT:issa on aina mainittu mm. järjestelmän IP-osoitteet, käyttäjätunnukset sekä paljon elementeille erityistä tietoa, kuten niiden ID-tunnisteet, joita tarvitaan esimerkiksi ottamaan yhteys elementtiin verkkohallintajärjestelmän kautta. Lisäksi kaikki testinajossa tarvittavat moduulit, kuten UltraCaller, testattavan päätelaitteen tiedot, sekä halutessa automaattinen raportointityökalu on kaikki julistettu SUT:issa.

BFAT:in kautta kaikki SUT:issa ilmoitetut asiat ovat näkyvissä kaikille testiajon eri elementeille ja kirjastoille. SUT voidaan myös viedä tai tuoda JSON-muodossa BFAT-käyttäjältä tai palvelimesta toiseen. Se on mallinnettu varta vasten mobiiliverkkojen testaukseen, jossa elementtejä sekä muuta dataa testiympäristöstä vaaditaan paljon enemmän kuin tavanomaisimmissa Robot-testeissä [46.]

SUT ei ole BFAT:ille uniikki ominaisuus, vaan se on tuttu käsite jo Klärckin diplomityöstä. Robot Frameworkin datalla ohjautuminen oikeastaan vaatii SUT:in olemassaolon, koska näitä tietoja ei itse testitapaukseen saisi laittaa. [46.]

Käytännössä testitiedostoissa SUT:iin saadaan yhteys testin alussa julistetun `SystemUnderTest`-olion kautta. Usein testit vaativat myös SUT:in lisäksi muuta dataa, joka voidaan BFAT:issa antaa Template Variables -muuttujien kautta. Nämä ovat ikään kuin komentoriviargumentteja, jotka annetaan BFAT:in graafisen käyttöliittymän kautta. Testien alussa nämä argumentit pitää ottaa vastaan erikseen. Tyypillisiä Template Variable -muuttujia olisi vaikka elinkaarentestissä kohdeohjelmistoversio, tai suorituskykytestissä tapahtuman korkein sallittu kesto aika. Näitä tietoja ei Robot Frameworkin filosofian sekä yleisjärjen myötä saa varsinaisessa testitiedostossakaan julistaa, koska ne ovat muuttuvia arvoja, jotka pitää jokaisessa testiajossa tarkistaa uudelleen. [46.]

5.4 Testiautomaation yhteenveto

Robot Frameworkin keveys tarkoittaa myös sitä, että BFAT:ista on voitu tehdä verkkosovellus eikä omalle tietokoneelle asennettavaa ohjelmistoa. Etuna tässä on myös se, että BFAT-ympäristön ja sen moduulien asentaminen, SUT:in luominen ja TAF-kirjastojen asentaminen voi tulla melko työlääksi. Verkkosovelluksessa jokaisen testaajan ei tarvitse tehdä itse tätä työtä omalla koneellaan. Kynnys BFAT:in käyttöönottoon on siis pienempi kuin monissa muissa testiautomaatiotyökaluissa.

Ympäristön pystyttäminen jokaiselle testaajalle erikseen on myös turhaa työtä, koska testit ajetaan joka tapauksessa etähallinnan avulla todellisessa ympäristössä. BFAT tai mikään muukaan Nokian automaatiotyökaluista ei tarjoa mahdollisuutta simuloida testin kulkua, joka onkin merkittävä heikkous varsinkin isompia ja hitaampia testejä kirjoittaessa. Käytännössä automaation toimivuus voidaan testata vain ajamalla se todellisessa ympäristössä.

Nokia Cloud RAN on valtava tuote. Radioilla, SmartNIC-korteilla, verkonhallintajärjestelmällä, ja kaikilla muilla Cloud RAN:in elementeillä on omat kehityksestä ja vielä erilliset testauksesta vastaavat organisaatiot. Näiden elementtien integroimisessa yhteen kokonaisuuteen tulee paljon odotettuja ja odottamattomia haasteita. Tämän takia Nokia Cloud RAN:illa onkin useita täysin testaukseen keskittyviä osastoja ja organisaatioita sekä Nokian sisällä että myös Nokian ulkopuolella, esimerkiksi Red Hatilla.

Cloud RAN:in laajuus myös aiheuttaa sen, että suurella osalla ylemmän tason testaajilta ei vaadita varsinaista ohjelmointikokemusta lainkaan. Koska suurin osa testeistä on manuaalisia eikä niitä välttämättä ole edes käytännöllistä ajaa automaatiolla, tämä ei ole merkittävä ongelma.

Automaatiotestejä käytetään lähinnä regressioajoissa, ja nämä testit on usein suunniteltu myös olevan käytännöllisesti automatisoitavissa. Näiden testien kirjoittaminen ja ajo muodostavat kuitenkin yllättävän pienen osuuden järjestelmätestausorganisaatioiden työmäärästä. Eniten aikaa kuluu testiympäristöjen rakentamiseen ja valmistautumiseen testiajoihin. Molemmissa tapauksissa potentiaali automaatiolle on pieni, muttei tosin olematon.

Kaikista yksinkertaisimpiakaan testejä ei ole kuitenkaan mahdollista automatisoida täydellisesti, vaan kaikki automaatiotestit tekevät tiettyjä oletuksia järjestelmästä ennen testin aloitusta, kuten että järjestelmä on toimiva ja että yhteys ympäristön elementtien ja testin suorittajakoneen välillä onnistuu. Testaus ja R&D organisaatioissa nämä eivät kuitenkaan aina paikkansa, ja vikoja määrittelyä lähes aina käsin. Cloud RAN on myös elinkaarensa alussa, mikä tarkoittaa sitä, että tuote ei ole niin vakaa kuin klassinen 5G RAN, josta kaikki Cloud RAN:in testiautomaatiotyökalut on otettu ja sovitettu uuteen tuotteeseen.

Nokian testiautomaatiotyökalut suoriutuvat kohtalaisen hyvin tavoitteissaan. Myös ohjelmistokehitystaustattomat testaajat voivat vähäisellä koulutuksella luoda ja ajaa Cloud RAN:in järjestelmätestejä. Tämä on melko hyvä saavutus, varsinkin kun pitää mielessä, että yksinkertaisetkin Cloud RAN:in testit voivat

olla erittäin työläitä suorittaa järjestelmän monimutkaisuuden takia, sekä manuaalisesti että automaattisesti.

Robot Framework toimii sekä testiautomaatioiden mahdollistaja että niiden heikoimpana linkkinä. Sen avulla yksinkertaisten testien ajaminen on helppoa, mutta taas monimutkaisissa testeissä päädytään käytännössä aina suoraan Pythoniin. Vaikka funktiota kutsuttaisiinkin Robotin kautta, mahdollisia vika- ja virhetilanteita on niin paljon, että käytännössä testaajalta väistämättä vaaditaan tietyn tason osaamista ja ymmärtämistä Pythonista. Miten paljon arvoa Robot tuo tällaisissa tilanteissa, voi olla kiistanalaista. Parhaita käytäntöjä seurattaessa sekä Python-kirjastoja että Robot Framework -testejä kirjoittaessa kuitenkin ongelmat pysyvät yleensä hallittavissa.

Robotin merkittävä valtti on, että testit ovat toisistaan riippumattomia. Jokaista testiä kirjoittaessa voidaan haluttaessa aloittaa puhtaalta pöydältä. Toisaalta puhtaalta pöydältä aloittaminen tarkoittaa sitä, että testien refaktorointi on hidasta. Koska jokaisen testitapauksen tulisi olla oma Robot-tiedostonsa, testeissä on väistämättä paljon toistoa, vaikka tärkeimmät keywordit ja toiminnot onkin siirretty omiin resurssitiedostoihinsa.

Testien ajamisen voi myös olla hyvin hidasta, koska niiden simuloinnille ei ole hyviä työkaluja. Ne pitää käytännössä siis aina muutoksien teon jälkeen suorittaa uudelleen todellisessa ympäristössä ajossa, joka voi testitapauksesta riippuen kestää viisi minuuttia tai viisi tuntia. Tämä puhumattakaan ajasta, joka kuluu testiympäristön valmistamisesta testiajoon ohjelmisto- ja laitteistotasolla.

Testiajoon valmistautumien voi helposti kestää kokonaisen päivän, ja testiympäristön vikatilanteissa automaatiotyökalut eivät auta lähes lainkaan. Vianmäärittely on vielä valtaosaisesti käsin tehtävää puuhaa, eikä sitä suurelta osin ole edes mahdollista automatisoida, koska vikoja aiheuttavat komponentit ovat usein niin nopeasti muuttuvia. Tuotteen vakaus ja vikoja aiheuttavat komponentit yhdenkin vuoden sisällä voivat muuttua täysin suuntaan tai toiseen. Sama toki pitää paikkansa muissakin elinkaarensa alussa olevissa suurissa tuotteissa,

ja pidemmällä aikavälillä myös Cloud RAN sekä sen järjestelmätestaustyökalut ovat kehittyneet parempaan suuntaan.

6 Cloud RAN:in tulevaisuus

Cloud RAN:in tulevaisuus näyttää vahvalta. Suurin osa uusista ja olemassa olevista 5G-verkoista on vielä työn kirjoitusaikana klassista 5G:tä, mutta tämä on nopeasti muuttumassa. Yhdysvalloissa ATT, T-Mobile ja Verizon ovat kaikki solmineet sopimuksia valmistajien kanssa rakentamaan uusia Cloud RAN -verkkoja, sekä myös korvaamaan olemassa olevia 5G-verkkoja Cloud RAN:illa.

Yhdysvaltojen lisäksi teleoperaattorit muuallakin maailmaa ovat solmineet suuriakin sopimuksia valmistajien kanssa. Euroopassa Deutsche Telekom ja Vodafone sekä Japanissa DoCoMo ovat erittäin suuria teleoperaattoreita, jotka ovat jo ottaneet, tai suunnittelevat ottavan Cloud RAN:in käyttöön omissa verkoissaan [47]. 5G on vasta lähestymässä elinkaarensa puoltaväliä, eikä 6G:n odoteta saapuvan kuluttajille ennen vuotta 2030. 5G Cloud RAN:ille on siis kysyntää nyt, jonka odotetaan vain kasvavan lähitulevaisuudessa. [48.]

Teleoperaattorien lisäksi Cloud RAN on myös innostanut valmistajia perinteiseltä datakeskuspuolelta liittymään mukaan ja tarjoamaan omia tuotteitaan mobiiliverkkoihin. Muun muassa HPE, Dell, ja Gigabyte kaikki tarjoavat omia palvelimiaan alustoiksi DU:ille tai CU:ille. Open RAN on myös tullut heti hyötykäyttöön; ATT tulee yhdessä alan isoimmista kaupoista yhdistämään Ericssonin, Fujitsun, Dellin ja Intelin tuotteita rakentamaan oman Cloud RAN-radioliityntäverkkonsa.

Lisäksi Google Cloud, Microsoft Azure ja Amazon Web Services -pilvipalveluntarjoajat ovat kaikki olleet Cloud RAN:in kehityksessä ja testauksessa mukana. Ensimmäiset datapuhelut on jo suoritettu julkisissa pilvipalveluissa. Julkinen pilvi tuo mukanaan valtavaa potentiaalia varsinkin tarjoamaan tilapäistä lisäkapasiteettia teleoperaattorien omien pilviratkaisujen päälle. [49.]

BBU:n pilkkominen DU:hun ja CU:hun on ollut myös erittäin järkevä ja tarpeeseen tullut muutos, joka tulee mahdollistamaan sekä tehokkaampien että samalla halvempien verkkojen rakentamisen, kuin mitä klassisen 5G:n tukiasema-arkkitehtuuri sallii. 6G:ssä taajuusalue tulee myös varmasti nousemaan vielä korkeammaksi, joka tulee nostamaan tukiasemien määrää entisestään. CU:ita sisältäviä Edge ja Far Edge -pilviä tullaan siis tarvitsemaan yhä enemmän. [50.]

Cloud RAN:in elinkaari näyttää ylittävän varsinaisen 5G:n. Vaikka 6G:stä ei ole vielä luotu standardia, Nokia ja Ericsson ovat kutsuneet omia ehdotuksiaan tulevalla 6G-arkkitehtuurille ”Ensimmäiseksi pilvinatiiviksi mobiiliverkkojen sukupolveksi”. Cloud RAN:in mukana tulleet avoimet rajapinnat ja virtualisointi ovat siis täällä jäädäkseen. [50.]

Lähteet

- 1 What is 5G. Verkkoaineisto. Qualcomm. <<https://www.qualcomm.com/5g/what-is-5g>>. Luettu 9.12.2023.
- 2 Gabriel, Caroline. What are key considerations for 5G sites?. Verkkoaineisto. Analysys Mason. <<https://www.analysysmason.com/research/content/perspectives/5g-key-considerations-rma18>>. 2019. Luettu 9.12.2023.
- 3 What is 5G Technology and What Does 5G Mean for IoT?. Verkkoaineisto. Telenor. <<https://iot.telenor.com/technologies/connectivity/5g>>. Luettu 23.12.2023.
- 4 Traficom. Suomalaisten netinkäytöstä puolet kulkee matkaviestinverkon kautta, 5G-verkkoja rakennetaan ripeästi tiheimmin asutuille alueille. Verkkoaineisto. Traficom. <<https://www.traficom.fi/fi/ajankohtaista/suomalaisten-netinkaytosta-puolet-kulkee-matkaviestinverkon-kautta-5g-verkkoja>>. Luettu 2.1.2023.
- 5 Mobile data traffic outlook. Verkkoaineisto. Ericsson. <<https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/dataforecasts/mobile-traffic-forecast>>. 2023. Luettu 1.2.2024.
- 6 Network slicing: Top 10 use cases to target. Ericsson. Raportti. 2023.
- 7 4G LTE Frequency Bands & Spectrum Allocations. Verkkoaineisto. 4G LTE Networks. <<https://www.4g-lte.net/about/lte-frequency-bands>>. Luettu 24.12.2023.
- 8 What is 5G?. Verkkoaineisto. Nokia. <<https://www.nokia.com/networks/5g/what-is-5g>>. Luettu 24.12.2023.
- 9 Amadeo, Ron. Don't buy a 5G smartphone—at least, not for a while. Verkkoaineisto. Ars Technica. <<https://arstechnica.com/gadgets/2018/12/dont-buy-a-5g-smartphone-at-least-not-for-a-while>>. 14.12.2018. Luettu 6.2.2024.
- 10 T-Mobile pursues a multi-band 5G spectrum strategy. Raportti. Ericsson. 2021.
- 11 5G vs 4G: big difference?. Verkkoaineisto. EGO Technology. <<https://egotechnology.co.uk/about-us-1/f/5g-vs-4g-big-difference>>. 20.8.2019. Luettu 24.12.2023.

- 12 Wankhede, Calvin. Does 5G use more battery on your smartphone?. Verkkoaineisto. Android Authority. <<https://www.androidauthority.com/does-5g-use-more-battery-3234940>>. 12.2.2024. Luettu 24.12.2023.
- 13 Samsung phone battery drains quickly on 5G service. Verkkoaineisto. Samsung. <<https://www.samsung.com/us/support/troubleshooting/TSG01201462>>. Luettu 18.1.2024.
- 14 Te kysyitte – me vastaamme: Seitsemän kovaa faktaa 5G:n teknologiasta. Verkkoaineisto. Telian toimitus. <<https://yhteiso.telia.fi/turvaverkko-105/te-kysyitte-me-vastaamme-seitsemaen-kovaa-faktaa-5g-n-teknologiasta-1972>>. 2021. Luettu 1.1.2024.
- 15 Nokia selected by Dedicado for 5G NSA network in Uruguay. Verkkoaineisto. Nokia. <<https://www.nokia.com/about-us/news/releases/2022/12/08/nokia-selected-by-dedicado-for-5g-nsa-network-in-uruguay>>. 2022. Luettu 1.1.2024.
- 16 Williams, Jordan. Why is 5G Tech Adoption Slowing Down?. Verkkoaineisto. DevX. <<https://www.devx.com/news/why-is-5g-tech-adoption-slowing-down>>. 23.10.2023. Luettu 18.1.2024.
- 17 Çekinmez, Fethi. Radio Access Network (RAN). Verkkoaineisto. Medium. <<https://medium.com/@fthcknmz/radio-access-network-ran-1fb033b708f1>>. 14.7.2023. Luettu 3.1.2024.
- 18 AlSuaybi, Abdullah. How BTS Process, Transmit and Receive Radio Waves? Verkkoaineisto. LinkedIn. <<https://www.linkedin.com/pulse/how-bts-process-transmit-receive-radio-waves-dr-abdullah>>. 19.6.2020. Luettu 3.1.2024.
- 19 About 3GPP. Verkkoaineisto. 3GPP. <<https://www.3gpp.org/about-us>>. Luettu 24.12.2023.
- 20 3GPP Partners. Verkkoaineisto. 3GPP. <<https://www.3gpp.org/about-us/partners>>. Luettu 13.2.2024.
- 21 C. Lala, Standardization Process of Cellular Technologies within 3GPP. Verkkoaineisto. Medium. <https://medium.com/@angelachen_19845/standardization-process-of-cellular-technologies-within-3gpp-8f085cb82178>. 15.8.2019. Luettu 13.2.2024.

- 22 Dyer, Keith. All the young DUs. Verkkoaineisto. The Mobile Network. <<https://the-mobile-network.com/2023/03/all-the-young-dus>>. 9.3.2023. Luettu 6.2.2024.
- 23 Morris, Ian. Losing AT&T is big blow to Nokia, but move makes joke of open RAN. Verkkoaineisto. Light Reading. <<https://www.lightreading.com/5g/losing-at-t-is-big-blow-to-nokia-but-move-makes-joke-of-open-ran>>. 5.12.2023. Luettu 18.1.2024.
- 24 Dawson, Doug. The Disappointment of 5G. Verkkoaineisto. CircleID. <<https://circleid.com/posts/20230127-the-disappointment-of-5g>>. 27.1.2023. Luettu 20.1.2024.
- 25 How 5G disappointed 'pretty much everybody'. Verkkoaineisto. Techxplore. <<https://techxplore.com/news/2023-02-5g-disappointed-pretty.html>>. 28.2.2023. Luettu 20.1.2024.
- 26 Mukherjee, Supantha. Ericsson to lay off 8,500 employees -memo. Verkkoaineisto. Reuters. <<https://www.reuters.com/business/media-telecom/ericsson-lay-off-8500-employees-memo-2023-02-24>>. 24.2.2023. Luettu 20.1.2024.
- 27 Nokia announces plans to axe up to 14,000 jobs, around 450 in Finland. Verkkoaineisto. Yle News. <<https://yle.fi/a/74-20055950>>. 19.10.2023. Luettu 20.1.2024.
- 28 Wolfe, Mike. What is C-RAN?. Verkkoaineisto. CommScope. <<https://www.commscope.com/blog/2016/commscope-definitions-what-is-c-ran>>. 1.1.2017. Luettu 6.2.2024.
- 29 Walko, John. Bell Labs chief opens up on O-RAN. Verkkoaineisto. EE Times. <<https://www.eetimes.com/bell-labs-chief-opens-up-on-o-ran>>. 6.2.2020. Luettu 7.2.2024.
- 30 O'Dowd, Brendan. Industry Set to Test the Six Nines Capability of New 5G Mobile Technology. Verkkoaineisto. Analog Devices. <<https://www.analog.com/en/thought-leadership/industry-set-to-test-the-six-nines-capability-of-new-5g-mobile-tech.html>>. 2021. Luettu 19.1.2024.
- 31 Owen, Gareth. Nokia: First Incumbent to Offer O-RAN Compliant Interfaces?. Verkkoaineisto. Counterpoint. <<https://www.counterpointresearch.com/insights/o-ran-vran>>. 15.6.2020. Luettu 10.12.2023.
- 32 Singh, Karan. Create an Azure Red Hat OpenShift cluster in less than 5 minutes. Verkkoaineisto. Red Hat.

- <<https://developers.redhat.com/articles/2022/03/04/create-azure-red-hat-openshift-cluster-less-5-minutes>>. 4.3.2022. Luettu 6.2.2024.
- 33 Morris, Ian. Nokia makes big bet on Red Hat, transferring 350 employees to it. Verkkoaineisto. Light Reading. <<https://www.lightreading.com/mobile-core/nokia-makes-big-bet-on-red-hat-transferring-350-employees-to-it>>. 29.6.2023. Luettu 15.12.2023.
- 34 Nokia-Siemens NetAct 3GPP V6 (CORBA). Verkkoaineisto. IBM. <<https://www.ibm.com/docs/en/netcoolomnibus/8?topic=integrations-nokia-siemens-netact-3gpp-v6-corba>>. Luettu 10.12.2023.
- 35 MantaRay NM. Verkkoaineisto. Nokia. <<https://www.nokia.com/networks/mobile-networks/mantaray-nm>>. Luettu 10.12.2023.
- 36 AirFrame Fronthaul Gateway. Verkkoaineisto. Nokia. <<https://www.nokia.com/networks/data-center/airframe-data-center/fronthaul-gateway>>. 20.1.2024.
- 37 Nokia and Elisa successfully complete Europe's first Cloud RAN trial powered by In-Line acceleration. Verkkoaineisto. Nokia. <<https://www.nokia.com/about-us/news/releases/2023/10/13/nokia-and-elisa-successfully-complete-europes-first-cloud-ran-trial-powered-by-in-line-acceleration>>. 13.10.2023. Luettu 10.12.2023.
- 38 Morris, Iain. Ericsson and Nokia go opposite ways on open RAN. Verkkoaineisto. Nokia. <<https://www.lightreading.com/open-ran/ericsson-and-nokia-go-opposite-ways-on-open-ran>>. 5.5.2023. Luettu 10.12.2023.
- 39 Hamilton, Thomas. What is System Testing? Types with Example. Verkkoaineisto. Guru99. <<https://www.guru99.com/system-testing.html>>. 22.1.2024. Luettu 26.1.2024.
- 40 Nokia AirFrame Rackmount. Verkkoaineisto. Intel. <<https://www.intel.com/content/www/us/en/partner/showcase/offering/a5b3b000000yOGAAY/nokia-airframe-rackmount.html>>. Luettu 8.2.2024.
- 41 Nokia AirFrame Open Edge 1U Server. Verkkoaineisto. Open Compute Project. <<https://www.opencompute.org/products/240/nokia-airframe-open-edge-1u-server>>. Luettu 8.2.2024.
- 42 Robot Framework katas. Verkkoaineisto. Eficode. <<https://github.com/eficode-academy/rf-katas>" <https://github.com/eficode-academy/rf-katas>>. 2020. Luettu 20.12.2023.

- 43 Klärck, Pekka. Data-Driven and Keyword-Driven Test Automation Frameworks. Diplomityö. 24.2.2006.
- 44 SSHLibrary. Verkkoaineisto. Robot Framework. <<https://github.com/robot-framework/SSHLibrary>>. Luettu 9.2.2024.
- 45 UltraCaller Customer Documentation. Käyttöopas. Nokia. 2023.
- 46 BFAT Customer Documentation. Käyttöopas. Nokia. 2023.
- 47 NTT DOCOMO to Add Fourth Virtualized Base Station to Open RAN Verification Environment. Verkkoaineisto. NTT Docomo. <https://www.ntt.como.ne.jp/english/info/media_center/pr/2022/0928_00.html>. 28.9.2022. Luettu 10.2.2024.
- 48 6G spectrum - enabling the future mobile life beyond 2030. Raportti. Ericsson. 3.2023.
- 49 Uitto, Tommi. The collaborative advantage: Nokia and partners delivering best-in-class Cloud RAN solutions. Verkkoaineisto. Nokia. <<https://www.nokia.com/blog/the-collaborative-advantage-nokia-and-partners-delivering-best-in-class-cloud-ran-solutions>>. 28.9.2022. Luettu 10.2.2024.
- 50 Soldani, David. Towards 6G Cloud Native and Secure by Design. Verkkoaineisto. LinkedIn. <<https://www.linkedin.com/pulse/towards-6g-cloud-native-design-dr-david-soldani>>. 21.9.2022. Luettu 8.2.2024.