



Katariina Moilanen

## **LTE-VERKON VOIP-TESTAUKSEN EMULOINTIYMPÄRISTÖ**

# **LTE-VERKON VOIP-TESTAUKSEN EMULOINTIYMPÄRISTÖ**

Katariina Moilanen  
Opinnäytetyö  
Kevät 2012  
Tietotekniikan koulutusohjelma  
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun seudun ammattikorkeakoulu  
Tietotekniikan koulutusohjelma, langaton tietoliikenne

---

Tekijä: Katariina Moilanen

Opinnäytetyön nimi: LTE-verkon VoIP-testauksen emulointiympäristö

Työn ohjaaja: Riitta Rontu

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2012

Sivumäärä: 58

---

LTE on matkapuhelinteknologia, jossa verkkoarkkitehtuuri ja näin ollen myös puhepalvelut tullaan toteuttamaan IP-pohjaisesti. Tämän opinnäytetyön aiheena oli selvittää LTE-verkossa toteutettavan puhelun puheen laatuun vaikuttavia tekijöitä ja suorittaa IP-pohjaisen puheen laadun testausta RUDE-verkkoemulaattoria apuna käyttäen. Opinnäytetyö tehtiin Rugged Tooling Oy:lle, jonka kehittämällä RUDE-verkkoemulaattorilla voidaan testata erilaisia IP-sovelluksia ja laitteita. Emulaattoria käytettiin opinnäytetyössä erilaisten puheen laatuun vaikuttavien tekijöiden emulointiin.

Aluksi tutustuttiin LTE:n verkkoarkkitehtuuriin ja sen tarjoamiin mahdollisuuksiin puhepalveluiden toteuttamiseksi. Koska solunvaihtotoiminteet puhelun aikana ovat yksi puheen laatuun vaikuttavista tekijöistä, handover-toiminteisiin perehdyttiin kattavasti. Puheen laatuun vaikuttavista tekijöistä perehdyttiin lisäksi puhekoodekkeihin, viiveeseen, viiveen vaihteluun ja pakettien katoamiseen. Tutkittiin myös erilaisia puheen laadun mittauksen keinoja ja LTE:n VoIP-vaatimuksia. Testausta varten tutustuttiin RUDE-verkkoemulaattoriin ja sen tärkeimpiin ominaisuuksiin. Käytännön osiossa tarkoituksena oli testata erilaisten verkkoolosuhteiden ja muiden laatuun vaikuttavien tekijöiden vaikutusta VoIP-puheluun. Testauksessa käytettiin RUDE-verkkoemulaattoria, Asterisk-serveriohjelmistoa ja X-Lite-ohjelmistopuhelinta.

Työn tuloksena saatiin selvitettyä tärkeimmät puheen laatuun vaikuttavat tekijät LTE-verkossa sekä niiden aiheuttajat. Näiden pohjalta voitiin määrittää erilaisia VoIP-testitapauksia, joita RUDE-verkkoemulaattorilla voidaan toteuttaa. Selvitettyjen osa-alueiden perusteella RUDElle voidaan mahdollisesti jatkossa luoda laajemmin valmiita testitapauksia tietyille puhelutilanteille ja esimerkiksi handovereille.

---

Asiasanat: matkapuhelinteknologia, LTE, puheen laatu, VoIP, handover

# ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Information Technology, Wireless telecommunication

---

Author: Katariina Moilanen

Title of thesis: Emulation environment for VoIP testing in LTE network

Supervisor: Riitta Rontu

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2012 Pages: 58

---

LTE is a mobile technology, where network architecture and hence also the voice services will be IP-based. The purpose of this thesis was to find out the factors affecting the voice quality in LTE voice calls and to perform IP-based voice quality measurements by using the RUDE network emulator. This thesis was made for Rugged Tooling Ltd. It has developed the RUDE network emulator that can be used for IP application and device testing. In this thesis the network emulator was used to emulate the factors affecting the voice quality.

LTE network architecture and the capabilities to offer voice services were first examined. Since the handover-procedures are one of the main factors affecting the voice quality, they were examined comprehensively. Other factors like voice codecs, delay, delay jitter and packet loss were further studied. The different ways to measure voice quality and the VoIP requirements in LTE are also presented. RUDE-emulator and its main features were explored. In the practical part the purpose was to test different network conditions and other voice quality factors that affect to VoIP call. In the measurements the RUDE network emulator, Asterisk server software and X-Lite softphone were used.

As a result of this thesis the main factors affecting the voice quality were resolved. Using these factors as basis, the VoIP test cases to be implemented with RUDE were found. The information of the quality affecting factors and procedures can help to create new test cases for different voice calls and handovers.

---

Keywords: mobile technology, LTE, voice quality, VoIP, handover

## **ALKULAUSE**

Haluan kiittää Rugged Tooling Oy:n toimitusjohtajaa Vinski Bräysyä opinnäytetyön tarjoamisesta. Kiitokset lehtori Riitta Ronnulle opinnäytetyön ohjaamisesta. Tekstinohjauksesta esitän kiitokset lehtori Tuula Hopeavuorelle. Lopuksi erityiskiitokset avopuolisolleni Markolle ja ystävälleni Mikolle, että olette jaksaneet olla tukena ja kuuntelijoina ilman kuulosuojaimia.

Oulussa 28.5.2012

Katariina Moilanen

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKULAUSE	5
SISÄLLYS	6
SANASTO	8
1 JOHDANTO	12
2 LTE-VERKON RAKENNE	13
2.1 LTE-verkon osat ja rajapinnat	14
2.2 Protokollapinot LTE-verkkorakenteessa	16
2.3 IP Multimedia Subsystem	19
2.3.1 IMS:n verkkorakenne	19
2.3.2 IMS:ssä käytettävät protokollat	20
3 HANDOVER-TOIMINTEET	22
3.1 X2-rajapintaan perustuvat handoverit	23
3.1.1 X2-handover, jossa S-GW ei muutu	23
3.1.2 X2-handover, jossa S-GW muuttuu	28
3.2 S1-rajapintaan perustuvat handoverit	29
4 PUHEEN LAATU LTE-VOIP-PUHELUISSA	35
4.1 Puhekoodekki	35
4.1.1 Adaptive Multi Rate -koodekit	35
4.1.2 Enhanced Voice Service -koodekki	37
4.2 Puheen laadun mittaaminen	38
4.2.1 Mean Opinion Score -menetelmä	38
4.2.2 Perceptual Evaluation of Speech Quality -menetelmä	39
4.2.3 ITU-T:n E-malli	40
4.3 Puheen laatuun vaikuttavat tekijät	40
4.4 Handovereiden vaikutus puheen laatuun	42
4.5 VoIP-vaatimukset LTE:ssä	44
5 RUGGED DEVIATION GENERATOR	46
6 PUHEEN LAADUN EMULOINTI	50
6.1 Asterisk-serveriohjelmisto	50

6.2 X-lite-ohjelmisto	51
6.3 Wireshark	51
6.4 Testijärjestely ja testitapaukset	52
7 YHTEENVETO	54
LÄHTEET	55

## SANASTO

3GPP	Third Generation Partnership Project, standardointijärjestö
3G	Third Generation, kolmannen sukupolven matkapuhelinteknologia
AMR-NB	Adaptive Multi-Rate narrowband, kapeakaistainen puhekoodekki
AMR-WB	Adaptive Multi-Rate wideband, leveäkaistainen puhekoodekki
AS	Application Server, sovelluspalvelin IMS-verkossa
CSCF	Call Session Control Function, puhelustunnon kontrollifunktio, IMS-verkon pääosa
CSFB	Circuit Switched Fallback, tiedonsiirron siirtyminen pakettikytkentäisestä verkosta piirikytkentäiseen verkkoon puhelun tullessa
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol, IP-osoitteita jakava protokolla
eNodeB	E-UTRAN Node B, E-UTRAN-verkon pääsolmu
EPC	Evolved Packet Core, LTE:n runkoverkko-osa
EPS	Evolved Packet System, LTE-verkon eri osa-alueista muodostuva IP-yhteyskerros
E-UTRAN	Evolved Universal Terrestrial Radio Access, LTE:n radioliityntäverkko
GERAN	GSM/EDGE Radio Access Network, GSM/EDGE-radioliityntäverkko
GTP-C	GPRS Tunnelling Protocol, Control Plane, tunneloinnista vastaava kontrollitasen protokolla
GTP-U	GPRS Tunnelling Protocol, User Plane, tunneloinnista vastaava käyttäjätason protokolla



GUI	Graphical User Interface, graafinen käyttöliittymä
HSS	Home Subscriber Server, tietokanta LTE- ja IMS-verkoissa, sisältää tilaajatietoja
IP	Internet Protocol, internetprotokolla
IP-CAN	IP Connectivity Access Network, IP-pääsyverkko
I-CSCF	Interrogating-CSCF, IMS-verkon osa
IMS	IP Multimedia Subsystem, IP-multimedia alijärjestelmä
LTE	Long Term Evolution, 3GPP-standardeihin perustuva matkapuhelinteknologia
MAC	Medium Access Control, radorajapinnan protokolla käyttäjä- ja kontrollitasolla
MME	Mobility Management Entity, liikkuvuuden hallintayksikkö LTE:ssä
MOS	Mean Opinion Score, puheen laadun arviointimenetelmä
MTSI	Multimedia Telephony Service for IMS, multimediapuheluita tarjoava palvelu IMS:ssä
NAS	Non-Access Stratum, kontrollitason protokollapinon ylin kerros liikkuvuuden ja pääsyn hallintaan
PBX	Private Branch Exchange, puheluiden välityskeino, joka palvelee vain tiettyä yritystä tai toimistoa
PCC	Policy and Charging Control, säännöt menettelytavoista ja laskutuksesta
PCM	Pulse Code Modulation, pulssikoodimodulaatio
PCRF	Policy and Charging Resource Function, runkoverkon elementti LTE:ssä, vastuussa PCC:stä

P-CSCF	Proxy-CSCF, proxyn tavoin toimiva IMS-verkon osa
PDCP	Packet Data Convergence Protocol, dataa pakkaava radorajapinnan protokolla käyttäjä- ja kontrollitasolla
PESQ	Perceptual Evaluation of Speech Quality, puheen laadun arviointimenetelmä
P-GW	Packet Data Network Gateway, pakettidatan yhdyskäytävä LTE:stä ulkoisiin pakettidataverkkoihin
QoS	Quality of Service, puhe- tai tiedonsiirtopalvelun laatuksiteerit
RLC	Radio Link Control, radiolinkin kontrollointiprotokolla käyttäjä- ja kontrollitasolla
RRC	Radio Resource Control, radioresurssien kontrollointiprotokolla kontrollitasolla
RTP	Real-Time Transport Protocol, reaaliaikainen siirtoprotokolla
RTCP	RTP Control Protocol, reaaliaikaisen siirron kontrolliprotokolla
RUDE	Rugged Deviation Generator, Rugged Tooling Oy:n kehittämä verkkoemulaattori
S1AP	S1 Application Protocol, S1-rajapinnan sovellusprotokolla
SAE GW	System Architecture Evolution Gateway, S-GW:stä ja P-GW:stä muodostuva LTE-runkoverkon osa-alue
S-CSCF	Serving-CSCF, palveleva CSCF, IMS-verkon osa
SCTP	Stream Control Transmission Protocol, luotettavan siirron tarjoava protokolla kontrollitasolla
SDP	Session Description Protocol, istunnonmäärittämisprotokolla
S-GW	Serving Gateway, palveleva yhdyskäytävä

SIP	Session Initiation Protocol, istunnonaloitusprotokolla
UE	User Equipment, käyttäjän laite
UDP	Unit Data Protocol, IP-pohjaiseen tiedonsiirtoon käytettävä protokolla
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System, 3G-matkapuhelinteknologia
UTRAN	Universal Terrestrial Radio Access Network, 3G-radioliityntäverkko
VoIP	Voice over IP, IP-pohjaisesti toteutettu puhepalvelu
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access, UMTS:ssä käytettävä radiorajapinta
X2AP	X2 Application Protocol, X2-rajapinnan sovellusprotokolla

# 1 JOHDANTO

Long Term Evolution (LTE) on 3G:tä (third generation) seuraava kehitysaskel Third Generation Partnership Projectin (3GPP) matkapuhelinteknologiassa. LTE on kehitetty vastaamaan korkeiden datanopeuksien, matalan viiveen, järjestelmän kasvavan kapasiteetin ja kustannustehokkaan järjestelmän asettamiin vaatimuksiin. Koska tiedonsiirto internetprotokollan yli on ylivoimaisesti eniten käytetty teknologia, myös LTE on suunniteltu tarjoamaan IP-pohjaista liikennettä päästä päähän tarjottavalla palvelunlaadulla, Quality of Servicellä (QoS). LTE perustuu kokonaan IP-pohjaisuuteen, joten puheluissa ei tueta piirikytkentäistä verkkoa. Puhelut tullaan tarjoamaan Voice over IP (VoIP) -palveluna, jolloin integrointi muiden multimedijärjestelmien kanssa helpottuu. VoIP asettaa kuitenkin haasteita puheenlaadulle, kun täysin luotettavaa siirtoväylää ei ole. (1; 2.)

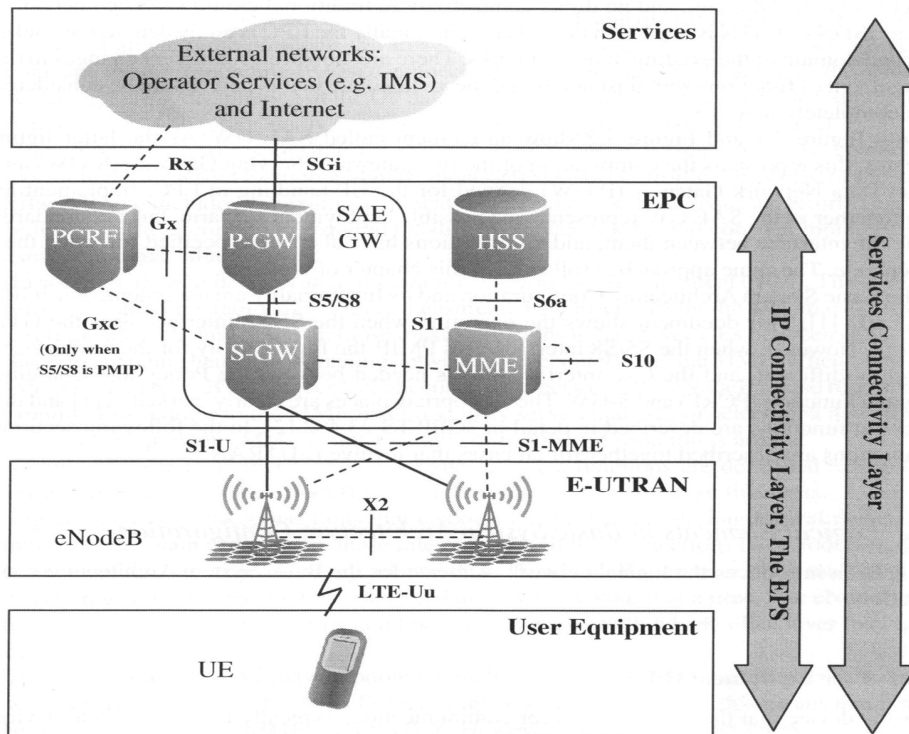
Rugged Tooling Oy on vuonna 2010 perustettu ohjelmistoalan yritys. Rugged Tooling Oy valmistaa sulautettuja reaaliaikaisia työkaluja IP-verkon aktiiviseen testaukseen ja monitorointiin. Ohjelmistosovelluksia tehdään myös asiakkaan pyynnöstä. Rugged Tooling Oy:n kehittämä Rugged Deviation Generator on verkkoemulaattori, jolla voidaan testata IP-sovelluksia ja laitteita. Emulaattoria käytetään opinnäytetyössä erilaisten puheen laatuun vaikuttavien tekijöiden emuloinnissa. (3.)

Opinnäytetyössä on tarkoituksena selvittää LTE-verkossa toteutettavan puhe-  
lun puheen laatuun vaikuttavia tekijöitä. Aluksi esitellään LTE-verkon rakennetta ja puhepalvelua tarjoavaa järjestelmää. LTE:n solunvaihtotoiminteet eli handoverit otetaan lähempään tarkasteluun. Tarkastellaan lisäksi erilaisia puhe-  
koodausmetodeja sekä erilaisia puheen laadun mittauksen keinoja. Käytännön osiossa on tarkoituksena testata erilaisten verkko-olosuhteiden ja muiden laatuun vaikuttavien tekijöiden vaikutusta VoIP-puheluun. Tarkoituksena on myös todistaa, että RUDE-emulaattori toimii oikein ja soveltuu kyseisiin mittauksiin.

## 2 LTE-VERKON RAKENNE

LTE-verkko on yksinkertaistettu, pakettidatalle optimoitu verkko. LTE-verkon tarkoituksena on toimia kokonaan IP-pohjaisena järjestelmänä, joten verkkorakenteessa ei käytetä ollenkaan piirikytkentäistä verkkoa. IP-pohjaisuuden vuoksi kontrollidata, käyttäjädata ja puhe- ja tekstidata siirretään pakettikytkentäisen IP-protokollan päällä. (4, s. 11.) Kokonaisuudessaan LTE-verkko yhdistyy myös muiden 3GPP-pääsyverkkojen sekä ei-3GPP-pääsyverkkojen kanssa. Näin voidaan taata eri tekniikoiden yhteensopivuus. Tässä opinnäytetyössä keskitytään lähinnä vain E-UTRAN-pääsyverkkoa käyttävään systeemiarkkitehtuuriin.

LTE-verkko voidaan jakaa neljään osa-alueeseen: User Equipment (UE) eli käyttäjän laite, Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN), Evolved Packet Core (EPC) ja Services eli palvelut. Näistä UE, E-UTRAN ja EPC muodostavat IP-yhteyskerroksen, jonka päätarkoituksena on tarjota IP-pohjainen liitettävyyttä. Tätä systeemin osaa kutsutaan usein myös Evolved Packet Systemiksi (EPS). E-UTRAN on LTE:n radioliityntäverkko, joka hallinnoi langatonta pääsyä tarjoamalla tukiaseman käyttäjille. EPC on runkoverkko-osa, joka hallinnoi käyttäjän liikkuvuutta ja yhdistää radioliityntäosan muihin verkkoihin ja palveluihin. Verkon osat on liitetty toisiinsa erilaisten rajapintojen kautta. (1; 4, s. 11; 5, s. 26.) Kuvassa 1 näkyvät E-UTRAN-verkkoon perustuva LTE:n verkkoarkkitehtuuri, sen olennaiset osat ja rajapinnat.



KUVA 1. LTE:n verkkoarkkitehtuuri (5, s. 25)

## 2.1 LTE-verkon osat ja rajapinnat

User Equipment (UE) on laite, jota loppukäyttäjä käyttää kommunikointiin, yleensä mobiililaite tai sulautettu laite. UE:n tärkeimpänä tehtävänä on tarjota käyttöliittymä loppukäyttäjälle. UE sisältää myös Universal Subscriber Identity Modulen (USIM), jota käytetään käyttäjän identifiointissa ja autentikoinnissa. UE yhdistyy E-UTRAN-verkkoon LTE-Uu-ilmarajapinnan kautta. (5, s. 26–27.)

E-UTRAN käyttää yksinkertaista yhden solmun (node) arkkitehtuuria, joka koostuu E-UTRAN Node B:istä (eNodeB, eNB). ENodeB muun muassa toimii tiedon välittäjänä UE:n ja EPC:n välillä, hallitsee ajastusta ja tarjoaa Radio Resource Management -toimintaa, kuten liikkuvuuden ja pääsyn hallintaa. ENodeB:llä on tärkeä rooli myös liikkuvuuden hallinnassa: radiosignaalin tason mittauksiin perustuen tehdään päätökset UE:n handovereista solujen välillä. ENodeB:t tarjoavat käyttäjätason ja kontrollitason UE:lle. ENodeB voi palvella useaa UE:tä, mutta jokainen UE yhdistyy vain yhteen ENodeB:hen. Rajapinta UE:n ja ENodeB:n välillä on langaton LTE-uu-ilmarajapinta. Toisena liitännätpisteenä eNodeB:lle toimii EPC. ENodeB:t yhdistyvät toisiinsa X2-rajapinnan kautta hando-

ver-tilanteissa. EPC:n ja ENodeB:n välisenä rajapintana toimii S1. S1-rajapinnan avulla ENodeB voi liittyä joko Mobility Management Entityyn (MME) käyttäen S1-MME-rajapintaa tai Serving Gatewayhin (S-GW) käyttäen S1-U-rajapintaa. (2; 5, s. 27; 6, s.18–19.)

Mobility Management Entity (MME) on pääasiallinen kontrollielementti EPC:ssä. MME on tyypillisesti palveluntarjoajan ylläpitämä serveri, joka toimii kontrollitasolla. MME:n toimintoihin kuuluvat muun muassa Packet Data Network Gateway (P-GW) ja Serving Gatewayn (S-GW) valinta, autentikointi ja liikkuvuuden hallinta. Liikkuvuuden hallintaan sisältyy muun muassa roaming, UE:iden sijainnin seuranta, MME:n valinta handover-tilanteissa, joissa MME vaihtuu, sekä kontrollisignalointi handovereille aktiivisessa tilassa olevan UE:n ja eNodeB:n, S-GW:n tai MME:n välillä. MME yhdistyy toisiin MME:ihin S10-rajapinnan kautta, S-GW:hen S11-rajapinnan kautta ja Home Subscription Serveriin (HSS) rajapinnan S6a kautta. (5, s. 28–29; 7, s.19, s. 51–52.)

Serving Gateway (S-GW) toimii käyttäjätason tunneloinnin ja kytkennän tarjoajana. S-GW toimii päätepisteenä E-UTRAN-suuntaiselle rajapinnalle. Päätehtävinä S-GW:illä on toimia lokaalina liikkuvuuden kiinnityskohtana sekä eNodeB:iden että muiden 3GPP-verkkojen välisissä handovereissa, pakettien reitittäminen ja eteenpäin lähetys sekä eNodeB:n uudelleenjärjestysfunktion avustus handoverin jälkeen. S-GW käyttää S5-rajapintaa liittyäkseen Packet Data Network Gatewayhin (P-GW). S-GW ja P-GW kuvataan usein yhtenä yhdyskäytävänä, System Architecture Evolution Gatewaynä (SAE GW). (5, s. 29; 7, s. 52.)

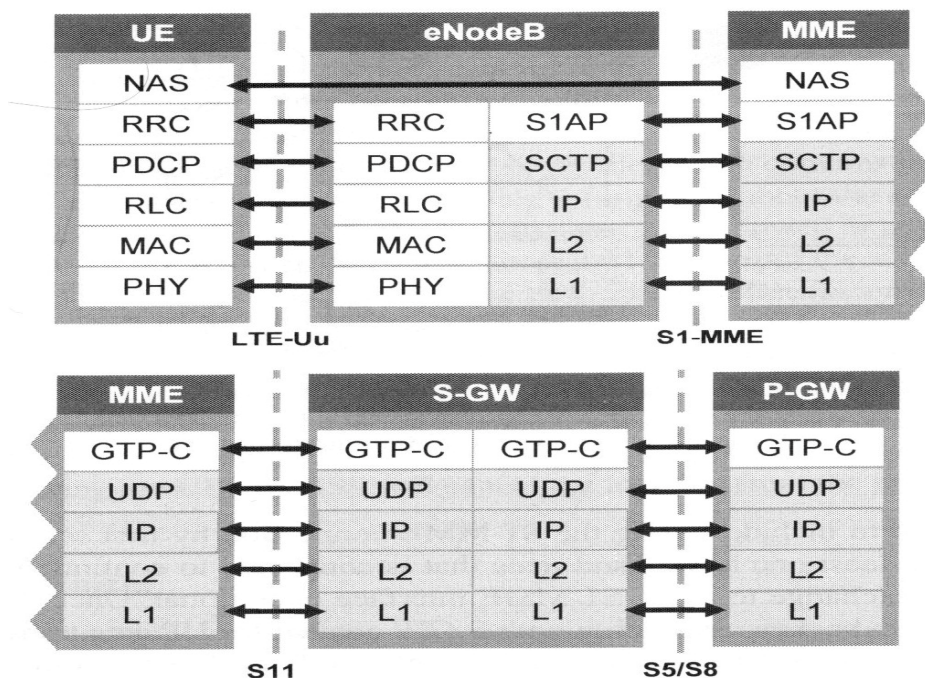
Packet Data Network Gateway (P-GW) on reititin EPS:n ja ulkoisten pakettidataverkkojen välillä. P-GW toimii korkeimman tason liikkuvuuden kiinnityskohtana järjestelmässä. P-GW jakaa UE:lle IP-osoitteen, jota UE käyttää kommunikointiin ulkoisten verkkojen, esimerkiksi Internetin kanssa. P-GW suorittaa myös liikenteen portitus- ja suodatustoimintoja. SGI toimii rajapintana P-GW:n ja pakettidataverkon välillä. (5, s. 31–32; 7, s. 20.)

P-GW kytkeytyy myös Policy and Charging Resource Functioniin (PCRF) rajapinnan Gx kautta. PCRF on verkkoelementti, joka on vastuussa Policy and Charging Controlista (PCC). Se päättää, kuinka palveluja käsitellään suhteessa

QoS:ään. PCRF voi kytkeytyä myös S-GW:hin rajapinnan Gxc kautta, mikäli rajapinta S-GW:n ja P-GW:n välillä on Proxy Mobile IP. (5, s. 32; 7, s. 20.)

## 2.2 Protokollapinot LTE-verkkorakenteessa

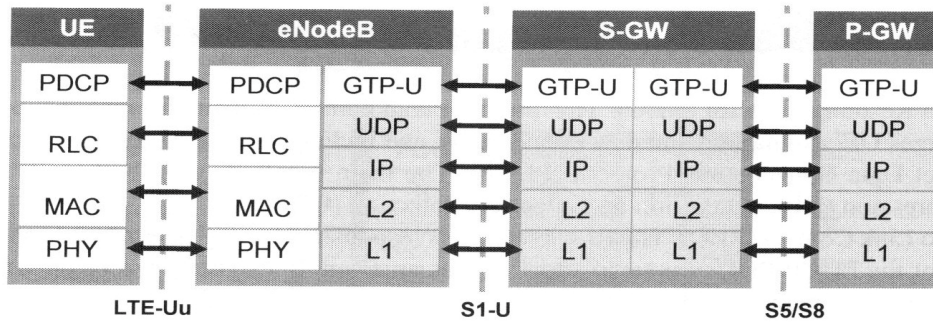
Kuva 2 esittää kontrollitason protokollapinoa LTE-verkossa. Kontrollitasolla lähetetään signaalintidataa. Pohjana on S1-rajapinta. Kuvan yläosa kuvaa UE:n, eNodeB:n ja MME:n välisiä protokollia ja rajapintoja, ja alaosa kuvaa MME:n suhteita S-GW:hin ja P-GW:hin päin. Kuvassa näkyvät sekä 3GPP-kehittämät (valkoisella pohjalla) että internetteknologioihin perustuvat protokollaosat (harmaalla pohjalla). (5, s. 35.)



KUVA 2. Kontrollitason protokollapino (5, s. 36)

Käyttäjätason protokollapino (kuva 3) on LTE-verkossa hyvin samankaltainen kuin kontrollitasolla. Käyttäjätasolla lähetetään käyttäjän dataa. Sekä signaaliointi kontrollitasolla että datan siirto käyttäjätasolla ovat pakettidataa, ainoastaan määrät ovat erilaiset. Kuva havainnollistaa UE:n välisiä yhteyksiä P-GW:hin eNodeB:n ja S-GW:n välityksellä.





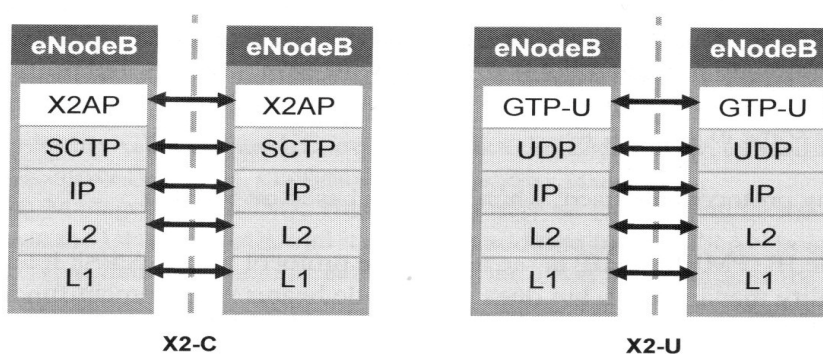
KUVA 3. Käyttäjätason protokollapino (5, s. 38)

Tässä osiossa kuvataan lyhyesti kunkin protokollakerroksen toiminta.

- Non-Access Stratum (NAS): EPS-bearerin valinta, autentikointi, idle-tilan liikkuvuuden hallinta, turvallisuuden hallinta.
- Radio Resource Control (RRC): radioressurssien käytön kontrollointi, UE-mittauksien hallinta, handover-toiminnot.
- Packet Data Convergence Protocol (PDCP): IP-headerin pakkaus, salaus.
- Radio Link Control (RLC): PDCP:n payload data unitien kuljetus, virheenkorjaus Automatic Repeat Request (ARQ) -menetelmällä.
- Medium Access Control (MAC): datan ajoitus, datan multipleksointi Layer 1 -kuljetuslohkoiksi, virheenkorjaus Hybrid ARQ -menetelmällä.
- Fyysinen kerros (PHY): tarjoaa välineet datan siirrolle, toimii Layer 1:nä LTE-Uu-radorajapinnalle.
- S1 Application Protocol (S1AP): UE:n yhteyksien hallinnointi E-UTRANin ja EPC:n välillä, osallistuminen handovereihin niiden koskessa EPC:a.
- Stream Control Transmission Protocol (SCTP)/Internet Protocol (IP) signaaloinnin siirto: SCTP tarjoaa luotettavan siirron, IP:ssä voidaan käyttää erilaisia data link- ja fyysisen kerroksen (L1 ja L1) teknologioita saatavuudesta riippuen.
- GPRS Tunneling Protocol, Control Plane (GTP-C): käyttäjätason yhteyksien hallinta, QoS-parametrien signaointi, liikkuvuuden hallinta EPC:ssä. Jos GTP:tä käytetään S5/S8-rajapinnalla, hallinnoidaan myös GTP-U-tunneleita.

- GPRS Tunnelling Protocol, User Plane (GTP-U): käytetään, kun S5/S8-rajapinta perustuu GTP:hen. Muodostaa GTP-U -tunnelin, joka lähettää EPS-bearerille kuuluvia loppukäyttäjän IP-paketteja.
- Unit Data Protocol (UDP)/IP-siirto: käytetään kuten standardoitua IP-siirtoa. Siirrossa voidaan käyttää epäluotettavaa UDP:ta TCP:n (Transmission Control Protocol) sijaan, koska ylemmät kerrokset tarjoavat virheenkorjauksen ja uudelleen lähetyksen avulla luotettavaa siirtoa. (5, s. 37–38; 6, s. 22, 48, 50–51.)

X2-rajapinnan protokollapino on hyvin samankaltainen S1-rajapinnan protokollapinin kanssa. Ainoa muutos on kontrollitasolla sovellusprotokollassa, jossa X2-rajapinnalla toimii X2 Application Protocol (X2AP). X2AP hallinnoi liikkuvuutta esimerkiksi handoverin valmistelulla ja sallimalla tietyn eNodeB:n vaihtaa vastuun tietystä UE:sta toiselle eNodeB:lle. X2AP tarjoaa myös muun muassa kuormanhallintafunktioita ja X2-rajapinnan resetointiin ja perustamiseen liittyviä funktioita. Käyttäjätasolla X2-rajapintaa käytetään väliaikaisesti datan lähetykseen handoverin aikana silloin, kun radiorajapintayhteys on jo katkaistu lähdepuolelta eikä yhteyttä ole vielä uudelleenmuodostettu kohdepuolella. (5, s. 38–39; 8, s. 12.) Kuva 4 esittää X2-rajapinnan protokollapinoja. Vasemmalla puolella on X2-C eli kontrollitason protokollapino ja oikealla puolella X2-U eli käyttäjätason protokollapino.



KUVA 4. X2-rajapinnan protokollapinit kontrollitasolla ja käyttäjätasolla (5, s. 38)

## 2.3 IP Multimedia Subsystem

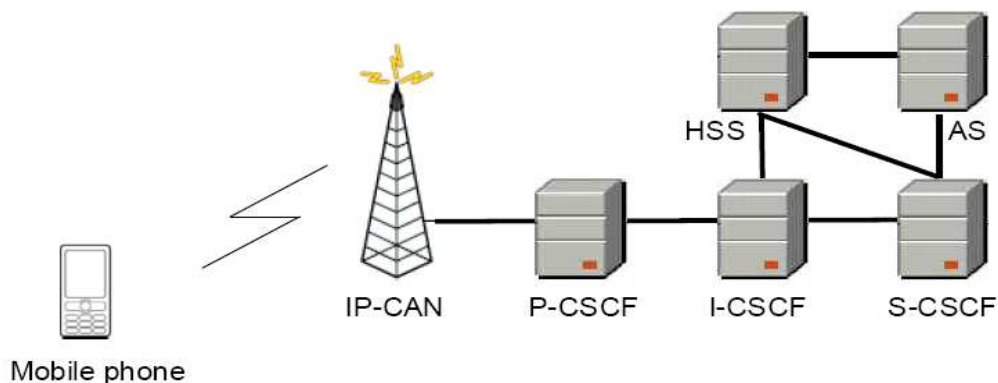
Services Domain eli verkon palveluita tarjoava osa voi sisältää erilaisia alijärjestelmiä, jotka taas voivat sisältää useita loogisia verkon solmuja. Palvelut voivat olla joko IP Multimedia Subsystemiin (IMS) perustuvia operaattoripalveluita, operaattoripalveluita, jotka eivät perustu IMS:ään, tai muita palveluita, jotka eivät ole mobiiliverkon operaattorin tarjoamia. Tässä opinnäytetyössä paneudutaan hieman lähemmin IMS:ään perustuviin palveluihin. IMS on esitelty alun perin jo 3GPP Release 5:ssä, mutta hyvien yhteensovitusmahdollisuuksien vuoksi se on otettu mukaan myös LTE-spesifikaatioihin heti ensimmäisestä eli Release 8:sta lähtien. (5, s. 34, 56.)

IMS on palvelujärjestelmä, jota operaattori voi käyttää muun muassa Session Initiation Protocolaa (SIP) käyttävien palveluiden tarjoamiseen. IMS on palveluverros EPS:n tarjoaman IP-yhteyserroksen päällä. Käytännössä IMS on riippumaton IP-yhteyserroksesta, mutta se on suunniteltu toimimaan 3GPP:n määrittelemien pääsyverkkojen päällä, ja se toimii saumattomasti myös PCC:n kanssa, tarjoten QoS:ää. IMS koostuu erilaisista toiminnallisista joukoista: istunnon hallinta- ja reititysfunktiot, tietokannat, palveluelementit ja yhteensovitus-elementit. (5, s. 34, 56.)

3GPP on määritellyt Multimedia Telephony Service for IMS -palvelun (MTSI) multimediapuheluiden tarjoamiseen. Tarkoituksena on tarjota samantasoinen tai parempi käyttäjäkokemus kuin piirikytkentäisessä verkossa käyttämällä saman verran verkkoresursseja. MTSI hyödyntää IMS:n laajoja mahdollisuuksia ja se sisältää medianhallinta- ja interaktiivisuustoimintoja. MTSI:n ominaisuuksia ovat muun muassa eri mediakomponenttien (puhe, video, teksti) hallinta istunnoissa, jitterin hallinta, laadun mittaukset ja pakettihävikin hallinta. (9, s. 11.)

### 2.3.1 IMS:n verkkorakenne

IMS:n verkkorakenne on melko monimutkainen, mutta koska tässä opinnäytetyössä on tarkoituksena tarkastella IMS:n ja MTSI:n toiminteita puhelun kannalta, esitetään vain IMS:n yli tarjottavien puhepalveluiden kannalta olennaisimmat osat (kuva 5).



KUVA 5. IMS:n verkkoarkkitehtuurin olennaisimmat osat puhelun kannalta (10, s. 21)

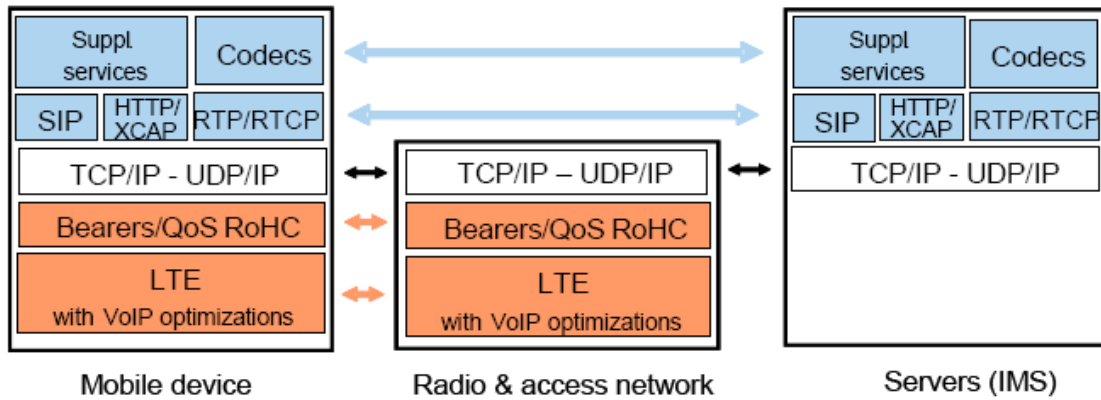
Kuvassa 5 näkyvä IP-CAN eli IP Connectivity Access Network on LTE:n tapauksessa E-UTRAN- ja EPC-verkoista muodostuva IP-pääsyverkko. Call Session Control Functionit (CSCF) ovat IMS:n ydinosia ja MTSI-puhelu käyttää CSCF-mekanismeja reitittämään kontrollitason signalointia puhelun osallistuvien UE:ien välillä. CSCF:ia on kolme, Proxy-CSCF (P-CSCF), Interrogating-CSCF (I-CSCF) ja Serving-CSCF (S-CSCF). P-CSCF on ensimmäinen kontaktipiste johon käyttäjä on yhteydessä. P-CSCF toimii kuten proxy, eli se hyväksyy pyynnöt ja lähettää ne eteenpäin. I-CSCF on operaattorin verkossa oleva pääsykontakti kaikille tilaajalle tarkoitetuille yhteyksille. S-CSCF on vastuussa rekisteröinnistä, reitityspäätösten teosta, istuntojen ylläpidosta ja tiedon lataamisesta HSS:stä. (9, s. 17; 10, s. 21.)

Home Subscriber Server (HSS) on käyttäjän päätietokanta, joka sisältää tilauskohtaiset tiedot puheluiden käsittelemiseksi verkkoyksiköissä. Application Server (AS) tarjoaa tiettyjä IP-palveluja, esimerkiksi puheluiden eteenpäin välitystä ja viestintää. (9, s. 17; 10, s. 21;)

### 2.3.2 IMS:ssä käytettävät protokollat

IMS käyttää IP-pohjaisia protokollia. IMS:n kautta muodostettavien puheluiden kannalta tärkeimmät UE- ja verkkoprotokollapinot esitetään kuvassa 6. SIP on tekstipohjainen protokolla rekisteröintiä, ilmoittamista ja IMS-istuntojen aloitusta varten. Session Description Protocol (SDP) on tekstipohjainen protokolla istunnon parametrien, kuten koodekin tyyppin, kaistanleveyden ja IP-osoitteiden neu-

votteluun. Real-Time Transport Protocol (RTP) ja RTP Control Protocol (RTCP) ovat reaaliaikaisten sovellusten siirtoon tarkoitettuja protokollia. Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP) määrittää IP-osoitteita. Siirrossa voidaan käyttää joko TCP:tä ja IP:tä tai UDP:ta ja IP:tä. (10, s. 21–22.)



KUVA 6. UE:n ja verkon protokollapinot IMS-puheluissa (11, s. 4)

### 3 HANDOVER-TOIMINTEET

Liikkuvuus tarjoaa selkeitä etuja verkon loppukäyttäjille. Pieniviiveisiä palveluja, kuten puhetta, voidaan ylläpitää nopeassakin liikkeessä. Liikkuvuus mahdollistaa luotettavan yhteyden ylläpidon solujen raja-alueilla, joissa paras palveleva solu vaihtelee. Liikkuvuus vaikuttaa usein verkon monimutkaisuuteen. LTE:n tavoitteena on tarjota saumatonta liikkuvuutta ja säilyttää silti verkon hallinta yksinkertaisena. Liikkuvuusmenetelmät voidaan jakaa idle-tilan (RRC idle) ja connected-tilan (RRC connected) liikkuvuuden hallintaan. Idle-tilassa UE on ns. lepotilassa ja connected-tilassa yhdistetty. Idle-tilassa liikkuvuus perustuu UE:n itsenäisiin solun uudelleenvalintoihin UE:n mittausten ja verkon tarjoamien parametrien mukaisesti. Connected-tilan liikkuvuus perustuu verkon kontrolloimiin solunvaihtotoiminteisiin eli handovereihin UE:n mittausten perusteella. (12, s. 165.)

Handovereita voidaan tehdä LTE-verkon sisäisesti tai LTE:n ja eri järjestelmien välillä. Eri järjestelminä toimivat toiset radiopääsyverkot 2G:lle tai 3G:lle, kuten GERAN (GSM/EDGE Radio Access Network) tai UTRAN (Universal Terrestrial Radio Access Network). Tässä opinnäytetyössä keskitytään LTE-verkon sisäisiin handovereihin. LTE-verkon sisäisissä handovereissa käytetään yleensä X2-rajapintaa, jonka avulla vaihdos kahden palvelevan eNodeB:n välillä voidaan tehdä. LTE-verkon sisäinen handover voi perustua myös S1-rajapintaan, silloin kun X2-rajapintaa ei ole käytettävissä. Handoverit ovat verkon kontrolloimia. E-UTRAN päättää, milloin handover tehdään ja mikä on kohdesolu. Handoverit perustuvat UE:n tekemiin mittauksiin palvelevasta ja naapurisolusta. E-UTRANin antamat parametrit kontrolloivat UE:n mittauksia. (7, s. 149, 154; 12, s. 170, 177.)

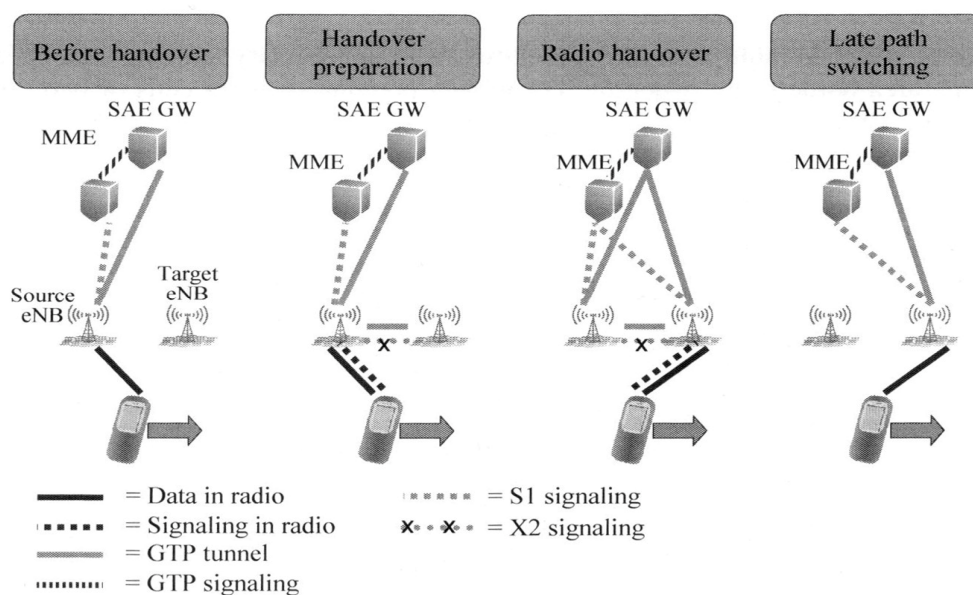
LTE:ssä käytetään vain kovia handovereita. Tämä tarkoittaa, että yhteys lähdesoluun katkaistaan samanaikaisesti tai ennen kuin uusi yhteys luodaan. Handovereita voidaan tehdä useista eri syistä. Laatuun perustuvat handoverit tehdään yleensä, kun UE:n mittausraportti osoittaa, että UE voi kommunikoida naapurisolun kanssa paremmalla kanavalaadulla kuin tällä hetkellä palvelevan solun kanssa. Kantamaan perustuvat handoverit siirtävät yleensä yhteyden toi-

seen radioliityntäverkkoon, koska UE menettää kuuluvuutta sen hetkisel­tä radioliityntäverkolta. Kuormaan perustuvat handoverit tehdään verkon kuormittu­misen tasoittamiseksi. Esimerkiksi jos LTE-solu on ruuhkainen, voidaan joitakin käyttäjiä siirtää lähellä oleviin LTE-soluihin. (13, s. 317.)

### 3.1 X2-rajapintaan perustuvat handoverit

#### 3.1.1 X2-handover, jossa S-GW ei muutu

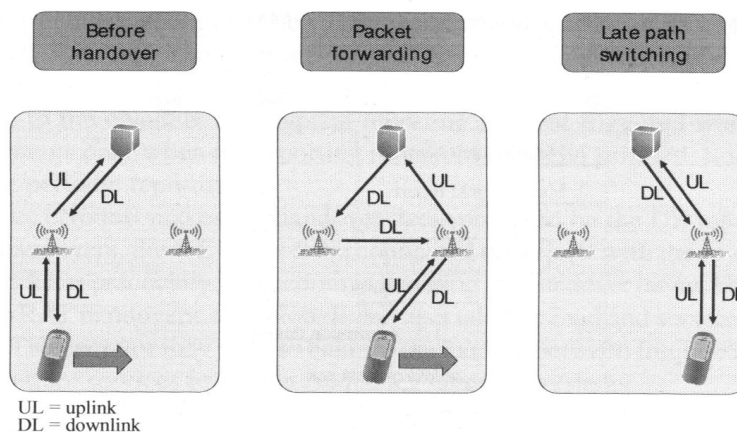
Ennen handoveria UE:lla on käyttäjätason yhteys lähdesolun e-NodeB:hen ja sitä kautta gatewayhin. Kontrollitasolla eNodeB:n ja MME:n välillä on S1-signalointiyhteys. Kun UE:n mittaama kohdesolu täyttää mittauseraportin kyn­nysarvot, UE lähettää laskentareportin eNodeB:lle. ENodeB muodostaa signa­lointiyhteyden ja GTP:n kohdesoluun. Kun kohde-eNodeB:llä on resurssi va­paana, lähde-eNodeB lähettää handover-komennon UE:lle. UE voi vaihtaa ra­dioyhteyden lähde-eNodeB:stä kohde-eNodeB:hen. Runkoverkon yhteys päivi­tetään viimeisenä late path switching -menettelyssä. Handover-prosessi esite­etään kuvassa 7. Kuvassa näkyy handover-toimet eri vaiheissa: ennen handove­ria (before handover), handoverin valmistelu (handover preparation), radio han­dover ja runkoverkon yhteyden päivitys (late path switching). UE liikkuu oikealle. (12, s. 170–171.)



KUVA 7. X2-pohjainen handover-prosessi (12, s. 170)



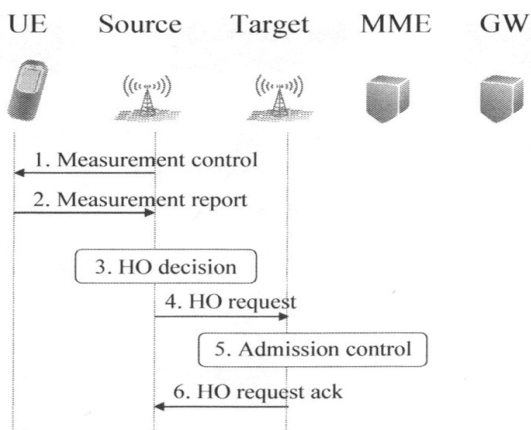
Käyttäjätasolla handoverin tapahtuessa downlink-suunnan paketit lähetetään lähde-eNodeB:ltä edelleen kohde-eNodeB:lle X2-rajapintaa pitkin. E-UTRAN-handoverit on pyritty saamaan häviöttömiksi käyttämällä pakettien edelleenlähetystä lähde- ja kohde-eNodeB:iden välillä. Lähde-eNodeB edelleenlähettää kaikki downlink RLC service -datayksiköt, joita UE ei ole ilmoittanut vastaanotaneensa. Kohde-eNodeB uudelleenlähettää ja priorisoi kaikki lähde-eNodeB:ltä saamansa downlink RLC service -datayksiköt heti vastaanotettuaan ne. UE on saattanut jo vastaanottaa joitakin paketteja lähde-eNodeB:ltä, mutta lähde-eNodeB ei ollut saanut ilmoitusta vastaanottamisesta. Tällöin kohde-eNodeB uudelleenlähettää paketit tarpeettomasti ja UE vastaanottaa saman paketin kahdesti. UE:n täytyy kyetä identifioimaan ja poistamaan kahdentuneet paketit. Uplink-suunnassa lähde-eNodeB toimittaa kaikki onnistuneesti vastaanotetut RLC service -datayksiköt runkoverkolle. UE uudelleenlähettää uplink RLC service -datayksiköt, joista se ei ole saanut vastaanottoilmoitusta lähde-eNodeB:ltä. Uplink-suunnassa voi myös esiintyä pakettien lähetystä kahteen kertaan. Uudelleenjärjestely ja päällekkäisyyksien esto uplink-suunnassa tehdään runkoverkossa. Pakettien edelleenlähetystä suoritetaan vain lyhyen aikaa, niin kauan kunnes runkoverkon yhteys on päivitetty. Kuvassa 8 näkyy käyttäjätason uplink- (UL) ja downlink (DL) -suuntainen pakettien lähetys handover-tilanteessa. Kuvassa esitetään tilanne ennen handoveria, pakettien edellenlähetystilanne ja runkoverkon yhteyden päivitys. (12, s. 171.)



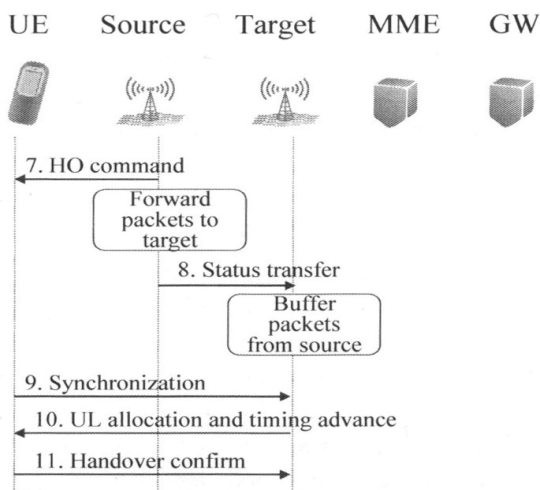
KUVA 8. X2-pohjainen handoverprosessi käyttäjätasolla (12, s. 171)



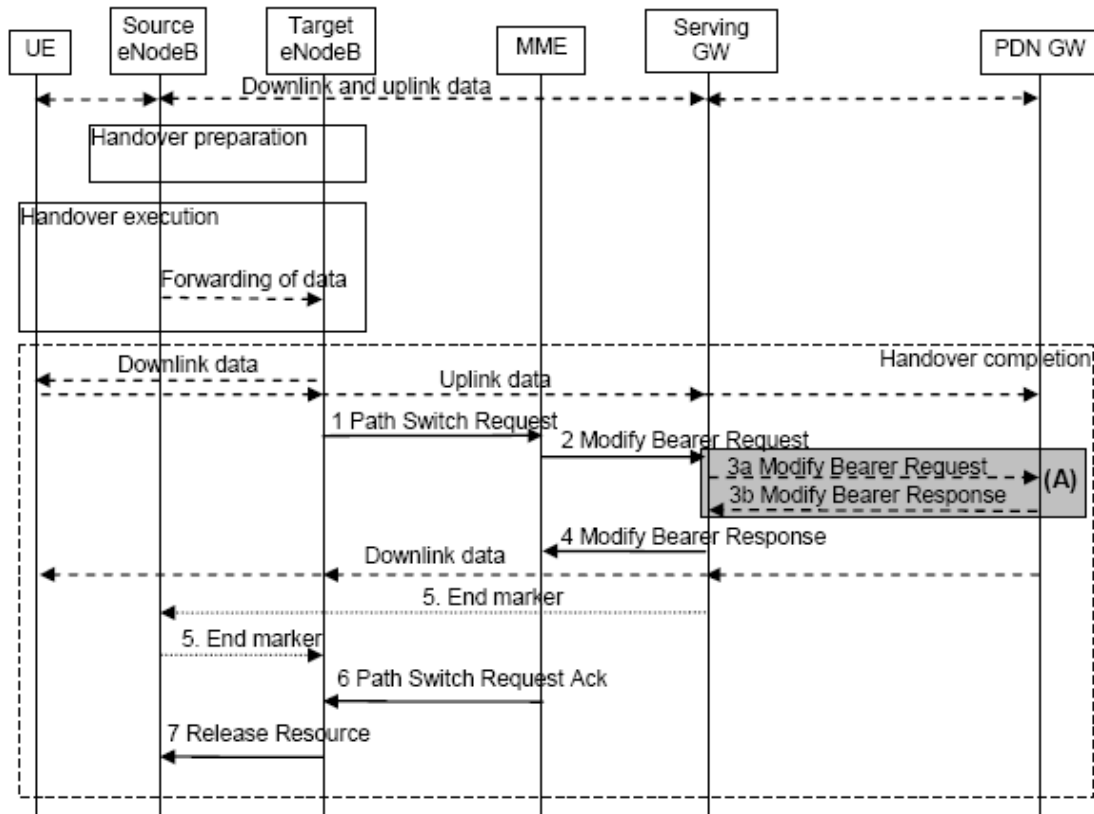
Handover-prosessin aikana lähetetään erilaisia signalointiviestejä handoveriin osallistuvien verkon osien välillä. Viestien lähetys kuuluu RRC-protokollalle. Kuvissa 9, 10 ja 11 esitetään viestien lähetys UE:n, lähde-eNodeB:n, kohde-eNodeB:n, MME:n ja gatewayn välillä. Handover-prosessi on eritelty kolmeksi eri kuvaksi, jotta handoverin eri vaiheet tulisivat selkeämmiksi. Ensimmäinen vaihe on handoverin valmistelu (kuva 9), jota seuraa handoverin suoritus (kuva 10) ja handoverin lopetus (kuva 11).



KUVA 9. X2-pohjaisen handoverin valmistelu (12, s. 172)



KUVA 10. X2-pohjaisen handoverin suoritus (12, s. 172)



KUVA 11. X2-pohjaisen handoverin lopetus, kun S-GW ei muutu (7, s. 150)

Handoverin valmistelu:

1. Lähde-eNodeB määrittää UE:n mittauksia Measurement Control -viestillä. Viesti määrittelee mittausraportin kynnyksarvot.
2. Kun kohdesolu täyttää raportoinnin kynnyksen, UE lähettää Measurement Report -mittaraportin eNodeB:lle.
3. Lähde-eNodeB tekee handover-päätöksen perustuen UE:n raporttiin.
4. Lähde-eNodeB lähettää Handover Request -pyynnön kohde-eNodeB:lle.
5. Kohde-eNodeB suorittaa pääsyn valvontaa.
6. Jos kohde-eNodeB hyväksyy handoverin suorituksen ja jos sillä on resursseja jäljellä, se lähettää Handover Request Acknowledge -hyväksymisviestin. Kohde-eNodeB on nyt valmis vastaanottamaan tulevan handoverin. (12, s. 173.)

Handoverin suoritus:

7. Lähde-eNodeB lähettää Handover Command -käskeyn UE:lle. Lähde-eNodeB aloittaa downlink-suuntaisen pakettien edelleenlähetyksen kohde-eNodeB:lle.
8. Lähde-eNodeB lähettää status-informaatiota kohde-eNodeB:lle osoittaakseen paketit, joista UE on antanut vastaanottoilmoituksen. Kohde-eNodeB aloittaa pakettien puskuroinnin.
9. UE synkronoituu kohde-eNodeB:n kanssa ja pääsee kiinni soluun random access -menettelyn avulla
10. Kohde-eNodeB lähettää UL-suunnan jako- ja ajoitusennakkotiedot UE:lle.
11. UE lähettää Handover Confirm -vahvistuksen kohde-eNodeB:lle. Kohde-eNodeB voi nyt lähettää dataa UE:lle. (12, s. 173.)

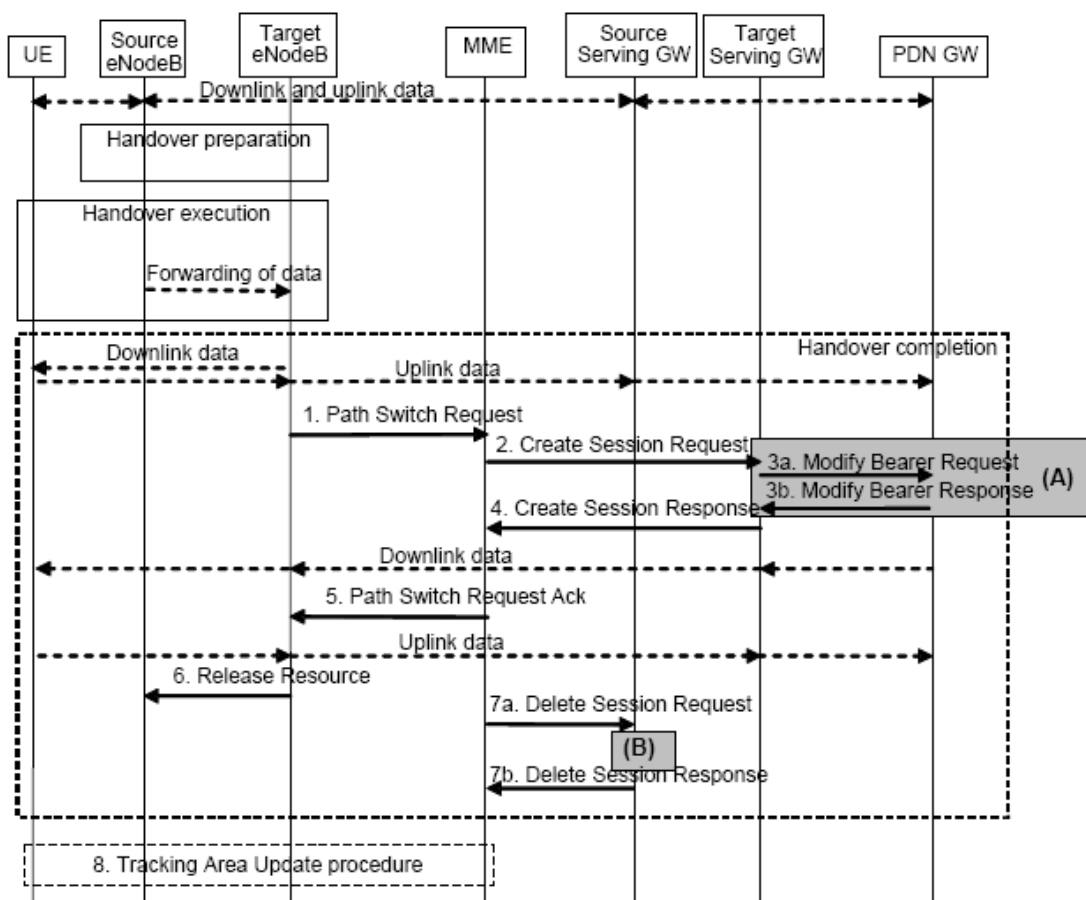
Handoverin lopetus:

1. Kohde-eNodeB lähettää Path Switch Request -viestin MME:lle, jossa kerrotaan, että UE on vaihtanut solua. Viestissä kerrotaan myös muun muassa vaihdettavat EPS bearerit. EPS bearer on kahden päätepisteen välinen virtuaalinen yhteys, joka tarjoaa bearer-palveluja.
2. MME lähettää Modify Bearer Request -viestin S-GW:lle. Viesti sisältää muun muassa eNodeB-osoitteet ja käyttäjätason DL-suunnan tunnelin päätepisteiden tunnisteet.
3. S-GW voi tietyissä tapauksissa informoida viestillä myös P-GW:tä.
4. S-GW lähettää Modify Bearer Response -viestin takaisin MME:lle. S-GW päivittää DL-reitin ja aloittaa pakettien lähetyksen kohde-eNodeB:lle käyttämällä uutta reittiä
5. S-GW lähettää End marker -paketteja kohde-eNodeB:lle pakettien uudelleenjärjestelyn helpottamiseksi.
6. MME vahvistaa Path Switch Request -viestin Path Switch Request Ack -viestillä, jossa ilmoitetaan myös, jos joidenkin EPS bearereiden vaihto epäonnistui.
7. Kohde-eNodeB lähettää lähde-eNodeB:lle Release Resource -viestin, joka sallii lähde-eNodeB:n vapauttaa resurssit. Lähde-eNodeB voi tämän

jälkeen vapauttaa UE:hen liittyvät radio- ja kontrollitason resurssit. (7, s. 150–151; 12, s. 173.)

### 3.1.2 X2-handover, jossa S-GW muuttuu

X2-rajapintaan perustuvissa handovereissa MME tekee päätöksen S-GW:n vaihdosta. Handoverin valmistelu ja suoritus ovat täysin samanlaiset kuin silloin, kun S-GW ei muutu. S-GW:n muutos vaikuttaa ainoastaan handoverin lopetus-toiminteisiin. (7, s. 149.) Kuvassa 12 esitetään handover-prosessi, kun käytetään X2-rajapintaa ja kun S-GW vaihtuu. Kuvan PDN GW tarkoittaa P-GW:tä.



KUVA 12. X2-pohjainen handover-prosessi, jossa S-GW vaihtuu (7, s. 152)

1. Handoverin valmistelun ja suorituksen jälkeen kohde-eNodeB lähettää Path Switch Request -viestin MME:lle, jossa kerrotaan, että UE on vaihtanut solua.
2. MME lähettää Create Session Request -viestin kohde-S-GW:lle. Kohde-S-GW antaa S-GW-osoitteet ja tunnelin päätepisteen tunnisteet S1-U-

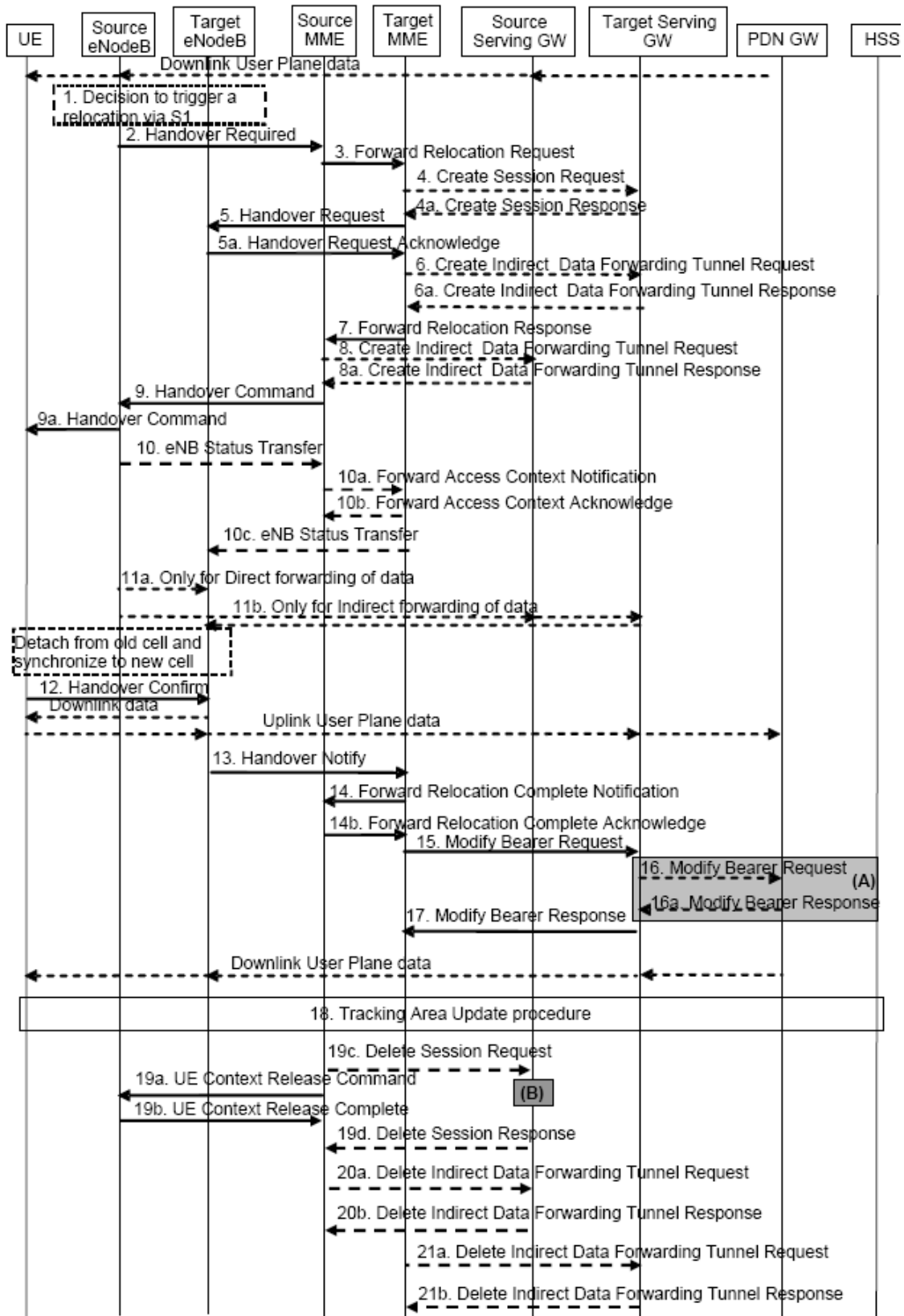
rajapinnan UL-liikenteelle. S-GW saa myös tiedon siitä, mitä protokollaa S5/S8-rajapinnalla tulee käyttää.

3. Kohde-S-GW antaa osoitteet ja tunnelin päätepisteen tunnisteet myös P-GW:ltä päin tulevalle DL-liikenteelle. S-GW lähettää P-GW:lle Modify Bearer Request -viestin. P-GW päivittää kontekstikenttensä ja lähettää Modify Bearer Response -paluuviestin S-GW:lle.
4. P-GW aloittaa DL-pakettien lähetyksen kohde-S-GW:lle käyttämällä uusia vastaanotettuja osoitteita ja tunnelin päätepisteitä. DL-paketit käyttävät uutta downlink-reittiä kohde-S-GW:n kautta kohde-eNodeB:lle. Kohde-S-GW lähettää Create Session Response -viestin MME:lle ja MME käynnistää ajastimen.
5. MME vahvistaa Path Switch Request -viestin Path Switch Request Ack -viestillä. Kohde-eNodeB aloittaa uusien S-GW-osoitteiden ja tunnelin päätepisteiden tunnisteiden käytön seuraavien UL-pakettien edelleenlähetyksessä. Path Switch Request Ack -viestissä ilmaistaan, jos joidenkin EPS bearereiden vaihto ei onnistunut.
6. Lähde-eNodeB ilmoittaa Release Resource -viestillä kohde-eNodeB:lle, että handover on onnistunut ja resurssit voidaan vapauttaa.
7. Kun MME:n asettama ajastin kun kulunut loppuun, MME vapauttaa bearerit lähde-S-GW:stä lähettämällä Delete Session Request -viestin. Lähde-S-GW vastaa Delete Session Response -viestillä. (7, s. 152–153.)

### **3.2 S1-rajapintaan perustuvat handoverit**

S1-rajapintaan perustuvia handovereita käytetään, kun X2-rajapintaa kahden eNodeB:n välillä ei ole. Lähde-eNodeB aloittaa handoverin lähettämällä Handover Required -viestin S1-MME-rajapinnan yli. Tämä menettely voi aiheuttaa MME:n ja/tai S-GW:n vaihdoksen. Lähde-MME valitsee kohde-MME:n. MME määrittää onko S-GW:n vaihdos tarpeellista. Jos S-GW:n vaihdos on tarpeellinen, MME valitsee kohde-S-GW:n käyttäen S-GW: valintafunktiota. S-GW:n valintafunktio valitsee saatavissa olevan S-GW:n palvelemaan UE:ta. Valinta perustuu verkkotopologiaan, toisin sanoen valittu S-GW palvelee UE:n sijaintialueella. Lähde-eNodeB päättää, mitä EPS bearereita käytetään downlink- ja valinnaisesti myös uplink-suuntaisten datapakettien edelleenlähetyksessä läh-

de-eNodeB:ltä kohde-eNodeB:lle. EPC ei puutu tähän valintaan. Pakettien edelleenlähetys voi tapahtua joko suoraan lähde-eNodeB:ltä kohde-eNodeB:lle tai lähde- ja kohde-S-GW:iden kautta. Jos X2-yhteys on saatavilla e-NodeB:iden välillä, suora edelleenlähetysreitti on saatavilla. Jos suoraa reittiä ei ole saatavilla, lähde-MME käyttää lähde-eNodeB:n antamaa merkkiä epäsuoran lähetyksen käytöstä. Lähde-MME ilmoittaa kohde-MME:lle epäsuoran lähetyksen käytöstä, ja kohde-MME päättää käytetäänkö sitä. (7, s. 34, 154.) Kuva 13 esittää viestintää S1-pohjaisen handover-prosessin aikana.



KUVA 13. S1-pohjainen handover-prosessi (7, s. 156)

1. Lähde-eNodeB tekee päätöksen S1-pohjaisesta handoverista. Päätös voi aiheutua X2-yhteyden puutteesta tai epäonnistuneesta X2-handoverista.
2. Lähde-eNodeB lähettää Handover Required -viestin lähde MME:lle. Lähde-eNodeB päättää, mitä bearereita käytetään datan edelleenlähetykseen. Viestissä ilmoitetaan myös onko suora reitityspolku lähde- ja kohde-eNodeB:iden välillä olemassa.
3. Jos lähde-eNodeB on päättänyt vaihtaa MME:n, se lähettää Forward Relocation Request -viestin kohde-MME:lle.
4. Jos MME vaihdetaan, kohde-MME määrittää jatkaako lähde-S-GW UE:n palvelemista. Jos S-GW vaihdetaan, kohde-MME valitsee uuden S-GW:n. Jos uusi S-GW valitaan, kohde-MME lähettää Create Session Request -viestin kohde-S-GW:lle. Kohde-S-GW antaa S-GW-osoitteet ja tunnelin päätepisteet UL-suunnan liikenteelle S1-U rajapinnalla. Kohde-S-GW lähettää Create Session Response -viestin vastauksena kohde-MME:lle.
5. Kohde-MME lähettää Handover Request -viestin kohde-eNodeB:lle. Viesti luo UE-yhteyden kohde e-NodeB:hen. Kohde-eNodeB lähettää Handover Request Acknowledge -viestin kohde-MME:lle.
6. Jos käytetään epäsuoraa lähetystä ja S-GW vaihdetaan, kohde MME asettaa edelleenlähetyksparametrit lähettämällä Create Indirect Data Forwarding Tunnel Request -viestin S-GW:lle. S-GW lähettää Create Indirect Data Forwarding Tunnel Response -viestin kohde-MME:lle. Jos S-GW:tä ei ole vaihdettu, epäsuora lähetys voidaan perustaa kohdassa 8.
7. Jos MME on vaihdettu, kohde-MME lähettää Forward Relocation Response -viestin lähde-MME:lle. Viestissä ilmaistaan myös S-GW:n vaihdosta.
8. Jos käytetään epäsuoraa lähetystä, lähde-MME lähettää Create Indirect Data Forwarding Tunnel Request -viestin S-GW:lle. Jos S-GW on vaihdettu, viesti sisältää tunnelin tunnusteen kohde-S-GW:hen. S-GW vastaa Create Indirect Data Forwarding Tunnel Response -viestillä lähde-MME:lle.



9. Lähde-MME lähettää Handover Command -komennon lähde-eNodeB:lle. Viesti sisältää tiedot pakettien edelleenlähetykseen käytettävistä beareista sekä vapautettavista bearereista. Handover Command lähetetään UE:lle. UE vapauttaa kaikki EPS bearerit, joille se ei saanut vastaavia EPS radio beareita kohdesolussa.
10. Lähde-eNodeB lähettää Status Transfer -viestin MME:n kautta kohde-eNodeB:lle. Viestissä lähetetään PDPCP-statusinformaatiota. Jos MME vaihdetaan, lähetetään Forward Access Context Notification -viestit lähde- ja kohde-MME:iden välillä. Lähde- tai kohde-MME lähettää informaation kohde-eNodeB:lle eNodeB Status Transfer -viestillä.
11. Lähde-eNodeB alkaa lähettää DL-dataa kohde-eNodeB:lle. Tämä voi olla joko suoraa (kohta 11a) tai epäsuoraa lähetystä (kohta 11b).
12. Kun UE on synkronoitunut onnistuneesti kohdesoluun, se lähettää Handover Confirm -viestin kohde-eNodeB:lle. Kohde-eNodeB:ltä lähetetyt DL-paketit voidaan lähettää UE:lle. UE voi lähettää myös UL-paketteja, jotka lähetetään edelleen kohde-S-GW:lle ja P-GW:lle.
13. Kohde-eNodeB lähettää Handover Notify -viestin kohde-MME:lle.
14. Jos MME on vaihdettu, kohde-MME lähettää Forward Relocation Complete Notification -viestin kohde-MME:lle. Kohde-MME lähettää Forward Relocation Complete Acknowledge -vastauksen kohde-MME:lle. Riippumatta MME:n vaihdoksesta lähde-MME:ssä käynnistetään ajastin, jolla valvotaan resurssien vapautusta.
15. MME lähettää Modify Bearer Request -viestin kohde-S-GW:lle.
16. Jos S-GW muuttuu, kohde-S-GW antaa osoitteet ja tunnelin päätepisteet downlink-liikentelle P-GW:n suunnasta. S-GW lähettää Modify Bearer Request -viestin P-GW:lle. P-GW palauttaa Modify Bearer Response -vastauksen kohde-S-GW:lle ja aloittaa DL-pakettien lähetyksen käyttäen uusia osoitteita ja tunnelin päätepisteitä. DL-paketit käyttävät uutta downlink-reittiä kohde-S-GW:n kautta kohde-eNodeB:lle. Jos S-GW ei muutu, viestiä ei lähetetä tässä vaiheessa, vaan downlink-siirto aloitetaan heti.
17. S-GW lähettää Modify Bearer Response -viestin MME:lle vastauksena Modify Bearer Request -viestiin. Jos S-GW ei muutu, S-GW lähettää end-marker-paketteja kohde-eNodeB:lle.

18. UE aloittaa seuranta-alueen päivitysprosessin (Tracking Area Update).
19. Kun kohdassa 14 asetettu ajastin pysähtyy, lähde-MME lähettää UE Context Release Command -käslyn lähde-eNodeB:lle. Lähde-eNodeB vapauttaa UE:hen liittyvät resurssit ja vastaa UE Context Release Complete -viestillä. Jos lähde-MME vastaanotti S-GW:n muutosilmoituksen Forward Relocation Response -viestissä (kohta 7), se poistaa EPS bearer-resurssit lähettämällä Delete Session Request -viestit lähde-S-GW:lle. Lähde-S-GW vastaa Delete Session Response -viesteillä.
20. Jos käytettiin epäsuoraa pakettien lähetystä, ajastimen pysähtyminen panee lähde-MME:n lähettämään Delete Indirect Data Forwarding Tunnel Request -viestin S-GW:lle. Viestillä käsketään vapauttaa kohdassa 8 luodut väliaikaiset epäsuoraan lähetykseen käytetyt resurssit.
21. Jos käytettiin epäsuoraa pakettien lähetystä ja S-GW muutettiin, ajastimen pysähtyminen panee kohde-MME:n lähettämään Delete Indirect Data Forwarding Tunnel Request message -viestin kohde-S-GW:lle kohdassa 6 luotujen väliaikaisten resurssien vapauttamiseksi. (7, s. 157–160.)

## 4 PUHEEN LAATU LTE VOIP-PUHELUISSA

Vaikka datansiirto ja erilaiset datapalvelut ovat kasvattamassa koko ajan suosiotaan, puhepalvelut ovat edelleen tärkeimpiä tulonlähteitä operaattoreille. LTE on suunniteltu tukemaan paitsi suorituskykyisiä datapalveluja, myös puhepalveluja hyvällä laadulla ja korkealla suorituskyvyllä. Koska LTE tukee vain pakettipohjaisia palveluja, piirikytkentäisiä puheluja ei käytetä vaan puhepalvelu toteutetaan Voice over IP (VoIP) -tekniikalla. (14, s. 259.) Tällä hetkellä kun puhepalveluja LTE-verkkoon ei ole vielä toteutettu, useat LTE:tä tarjoavat operaattorit käyttävät mekaniikkaa, joka siirtää yhteyden piirikytkentäiseen verkkoon puheluja käsiteltäessä. 3GPP:n standardisoimaa mekaniikkaa kutsutaan circuit switched fallbackiksi (CSFB). 3GPP-standardin mukainen sekä operaattoreiden ja GSMA:n kehittäämä tekniikka VoIP-puheluiden tarjoamiseksi on IMS:ään ja MTSI:hin perustuva VoLTE (Voice over LTE).

### 4.1 Puhekoodekki

VoIP siirtää puhedatapaketteja pakatussa muodossa, jotta siirrettävä kuorma olisi kevyempi. Tähän käytetään koodekkeja, joista jokainen on suunniteltu tietynlaiseen käyttöön. Koodekki on algoritmi, jota käytetään muuntamaan puhesignaalit digitaaliseksi dataksi, jota voidaan siirtää internetin tai minkä tahansa verkon yli VoIP-puhelun aikana. Koodekit suorittavat yleensä koodausta ja dekodeausta, pakkausta ja purkua sekä joissain tapauksissa myös salausta ja salauksen purkua. Puheen koodauksessa alkuperäinen analoginen puhe muunnetaan digitaaliseksi siirtoa varten. Dekoodauksessa puhe muunnetaan takaisin analogiseksi. Kaistanleveyttä ei ole välttämättä paljon käytettävissä, joten lähetettävää dataa täytyy pienentää pakkaamalla ja näin parantaa suorituskykyä. Pakkauksessa voidaan käyttää erilaisia algoritmeja, jotta tieto saadaan esitettyä pienemmällä bittimäärällä. Vastaanottopäässä pakkaus voidaan purkaa. (15; 16.)

#### 4.1.1 Adaptive Multi Rate -koodekit

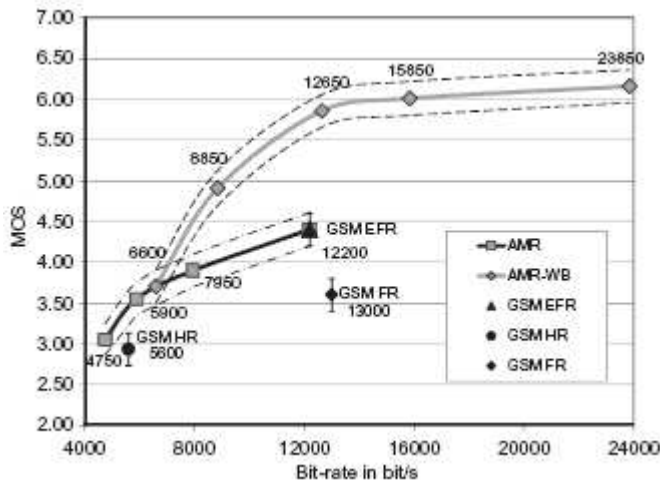
Kun LTE:n ensimmäinen julkaisu Release 8 esiteltiin, koodekit periytyivät suoraan aiemmista julkaisuista ja teknologioista 2G:ssä ja 3G:ssä. Koodekkien toi-

minnallisuus ja suorituskyky havaittiin sopivaksi myös LTE:lle ja useita paketti-pohjaisia siirto-ominaisuuksia, kuten jitterin hallinta, oli jo kehitetty ja spesifioitu 3GPP-koodekeille MTSI:ssä. Adaptive Multi Rate (AMR) on 3GPP:n oletuskoodekki ja kaikkien puhetta tarjoavien päätteiden tulee tukea sitä. Sekä kapea-että laajakaistaisessa AMR-koodekissa on matala koodausviive, joten ne soveltuvat reaaliaikaisiin puhepalveluihin. Ulkopuolisiin mobiiliverkkoihin soitettaessa saatetaan tarvita transkoodausta linkeissä, jotka käyttävät G711-koodausta eli Pulse Code Modulation (PCM) -koodausta. Transkoodaus kuitenkin huonontaa puheenlaatua. (17.)

AMR-puhekoodekki lisättiin alun perin 3GPP Release 98:aan GSM-verkolle, jotta koodekin nopeus voitaisiin sovittaa radio-olosuhteiden mukaisesti. Sama koodekki sisällytettiin myös myöhempisiin releaseihin ja sitä voidaan käyttää myös LTE:ssä puheen koodaukseen. Koska AMR:stä on kehitetty myös laajakaistainen koodekki, käytetään kapeakaistaisemmasta koodekista usein AMR-Narrowband (AMR-NB) -nimitystä. AMR-NB:n tiedonsiirtonopeudet vaihtelevat 4,75–12,2 kbit/s:n välillä. AMR-NB käyttää 8 kHz:n näytteenottotaajuutta, joka tarjoaa 300–3400 Hz:n kaistanleveyden. (14, s. 259.)

AMR-Wideband (AMR-WB) -koodekki lisättiin 3GPP Release 5:een. AMR-WB:ssä käytetään 16 kHz:n näytteenottotaajuutta, joka tarjoaa 50–7000 Hz:n kaistanleveyden ja paremman äänenlaadun. Matalien 50–200 Hz:n taajuuksien mukaan ottaminen lisää äänen luonnollisuutta ja mukavuutta, kun taas korkeat 3400–7000 Hz:n taajuudet parantavat äänen eriteltävyyttä ja sitä kautta ymmärrettävyyttä. AMR-WB:n tiedonsiirtonopeudet vaihtelevat 6,6–23,85 kbit/s:n välillä. Tyypillinen nopeus on 12,65 kbit/s, joka on samanlainen AMR-NB:n 12,2 kbit/s nopeuden kanssa. AMR-WB tarjoaa kuitenkin huomattavasti paremman äänenlaadun samalla tiedonsiirtonopeudella ja sitä voidaan sanoa laajakaistaiseksi audioksi kapeakaistaisella radiosiirolla. Sekä AMR-NB:ssä että AMR-WB:ssä koodaustilat voidaan valita dynaamisesti. Näin voidaan sopeutua muutoksiin esimerkiksi siirto-ominaisuuksissa tai ruuhkaisessa verkossa. Kuvassa 14 esitetään eri puhekoodekkien vertailua Mean Opinion Scoren (MOS) perusteella. Tässä Nokian tekemässä testauksessa MOS jakaantuu puheen laadun mukaisesti poikkeuksellisesti numeroihin 1–9, joista numero 1 on ”erittäin huo-

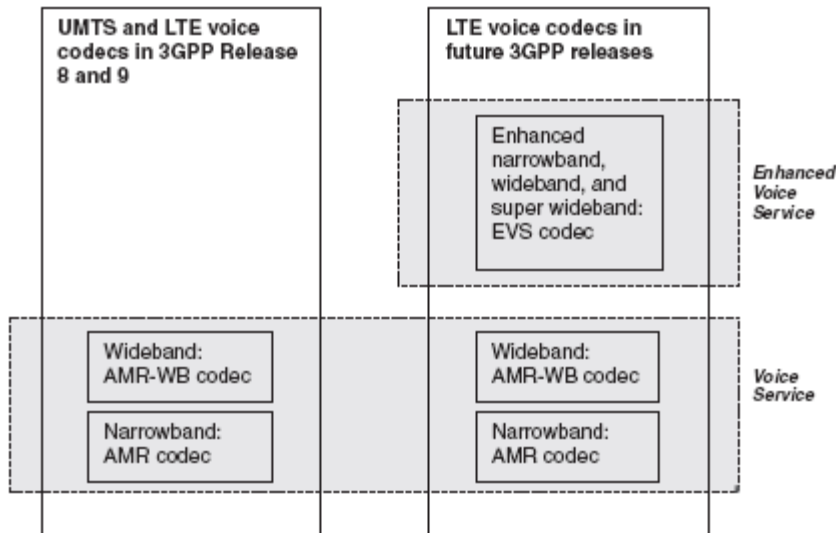
no” ja numero 9 ”erinomainen”. Vertailussa oli GSM-koodekkeja sekä AMR- ja AMR-WB-koodekit. Kuvasta nähdään, että AMR-WB tarjoaa huomattavan edun havaitussa puheenlaadussa. (14, s. 259–260; 17.)



KUVA 14. Puhekoodekkien äänen laadun vertailu (17)

#### 4.1.2 Enhanced Voice Service -koodekki

3GPP on kehittämässä LTE:lle uutta koodekkia, Enhanced Voice Serviceä (EVS). EVS:n on tarkoitus tarjota merkittävästi parannettua äänen laatua puhe-  
luihin. Lisäksi tavoitteena on tehokkaampi siirto ja optimoitu toiminta IP-  
ympäristössä. EVS-koodekki ei tule korvaamaan olemassa olevia AMR-  
koodekkeja, vaan tarjoaa täydentävän ja korkealaatuisen koodekin suuremmilla  
audiokaistanleveyksillä. Kuva 15 kuvaa EVS:n ja AMR-koodekkien suhdetta  
nykyisissä ja tulevista 3GPP-julkaisuissa. (17.)



KUVA 15. 3GPP-puhekoodekit (17)

EVS käyttää super widebandia (50–14 000 Hz), mutta tukee myös narrowbandia ja widebandia. EVS:n päätavoite on parantaa käyttäjäkokemusta sekä kahden osapuolen välisissä että konferenssipuheluissa. Audiokaistan suurentaminen on pääasiallinen keino äänen laadun parantamiseksi. Vaihtoehtoisesti parempi käyttäjäkokemus voidaan saavuttaa uusilla ominaisuuksilla, kuten stereo- ja multi-channel-koodauksella. Näillä ominaisuuksilla on kyky välittää merkittäviä määriä tietoa puhelu ympäristöstä. Ongelmallista EVS:n käyttöönotossa on yhteentoimivuuden takaaminen muiden verkkojen ja aiempien laitteiden kanssa sekä liikkuvuuden hallinta liikuttaessa solusta toiseen sekä LTE- että muissa verkoissa. Transkoodausta ei tulisi käyttää, sillä se huonontaa äänen laatua kun tarvitaan enemmän koodausta ja kun siirtoviive kasvaa. Tämän takia EVS-koodekin tulisi olla taaksepäin yhteensopiva olemassa olevien 3GPP-koodekkien, esimerkiksi AMR-WB:n kanssa. (17.)

## 4.2 Puheen laadun mittaaminen

### 4.2.1 Mean Opinion Score -menetelmä

Mean Opinion Score (MOS) on ihmisen havaintoihin perustuva puheen laadun arviointimenetelmä. MOS ilmaisee numeerisesti vastaanotetun median laadun tiedonsiirron ja koodekkien suorittaman pakkaamisen jälkeen. MOS esitetään lukuna 1:stä 5:een, joista 1 on huonoin ja 5 paras arvo. Lukujen ei kuitenkaan

tarvitse olla kokonaislukuja ja erilaiset kynnysarvot esitetään usein desimaalilukuina MOS:n spektriltä. Esimerkiksi piirikytkentäisen verkon puheenlaatu on MOS-arvoltaan 4,0–4,5:n väliltä ja tätä voidaan pitää erittäin hyvänä laatuena ja vertailuarvona muille puhepalveluille. Tyypillisesti tavallisen VoIP-puhelun laatu voi vaihdella arvosta 3,5 arvoon 4,2. Alle 3,5:n menevät MOS-arvot eivät useiden käyttäjien mielestä ole hyväksyttäviä. MOS-testit suoritetaan tietyllä määrällä ihmisiä, jotka kuuntelevat ääninäytteitä ja arvioivat ne välillä 1–5. Arvoista lasketaan aritmeettinen keskiarvo ja saadaan MOS. MOS:ää voidaan käyttää VoIP-palvelujen ja palveluntarjoajien vertailussa, mutta tärkeämpi osuus sillä on koodekkien kehittämisessä. Kun ääntä pakataan koodekeilla kaistan säästämiseksi, voidaan MOS-mittauksilla varmistaa, että äänen laatu ei kärsi liikaa. MOS-mittauksissa oletetaan, että tiettyä palvelua, verkkoa tai koodekkia analysoitaessa olosuhteet olisivat ideaaliset, joten muut puhelun laatuun vaikuttavat tekijät, kuten kaistanleveys tai käytettävä laitteisto eivät saa vaikuttaa liikaa mittaukseen. MOS-mittauksia voidaan suorittaa myös ohjelmistollisesti, tai etenkin VoIP-puheluissa mittaamalla IP-verkon suorituskykyä. (18.)

#### **4.2.2 Perceptual Evaluation of Speech Quality -menetelmä**

Piirikytkentäiseen verkkoon kehitettyjä puheen laadun mittauksia voidaan käyttää myös VoIP:ssa. Näitä ovat audiomittaukset, kuten PESQ (Perceptual Evaluation of Speech Quality), taajuusvastemittaukset ja särömittaukset. Psykoakustiset koodausmenetelmät hyödyntävät ihmisen kuuloaistin ominaisuuksia ja poistavat siirrettävästä signaalista osat, joita ei havaita. Puhetta pakattaessa käytetään psykoakustisia mittausmenetelmiä, joilla määritetään aiheuttaako puheensiirtotekniikka puheen laadun heikkenemistä. PESQ on ITU-T:n (International Telecommunications Union) julkaisema mittausmenetelmä, jolla on mahdollista tehdä mittauksia puhesignaaleista, joita siirretään matalilla bittinopeuksilla ja joissa käytetään tehokkaasti pakkaavia psykoakustisia koodausmetodeja. PESQ käyttää algoritmia, jonka avulla puhesignaaleja voidaan arvioida vertaamalla niitä referenssisignaaleihin. PESQ on kehitetty käyttämällä suurta määrää ääninauhoituksia, jotka sisälsivät eri puhujien eri kielillä puhumia lauseita. Nauhoitukset on tehty käyttämällä useita eri puheen koodausmenetelmiä, eri laadun tasoja ja tyypillisiä verkon siirtohäiriöitä. Kuuntelutesteissä testikuunteli-

jat luokittelivat näytteiden puheen laadun  $-0,5$ :stä (huono laatu)  $4,5$ :een (erinomainen). PESQ:n tavoitteena on tarjota alkuperäisen referenssisignaalin ja huonontuneen mitatun signaalin vertailuun pohjautuva metodi, joka korreloi hyvin kuuntelutestien tulosten kanssa. PESQ-mittauksen tekemiseksi referenssisignaali yhdistetään testattavan järjestelmän inputiin ja mittaussignaali otetaan testattavan järjestelmän outputista. (10, s. 39.)

#### **4.2.3 ITU-T:n E-malli**

ITU-T on kehittänyt E-mallin, laskennallisen mallin joka yhdistää kaikki äänen laatuun vaikuttavat heikentävät parametrit yhdeksi tekijäksi, joka voidaan muuntaa MOS-mittakaavaan. E-malli perustuu konseptiin, jossa kaikki äänen laatua heikentävät tekijät voidaan laskea erikseen. Saatu tulos on siirtoa luokitteleva R-tekijä, joka vaihtelee arvosta 0 (huono) arvoon 100 (erinomainen). R-tekijän arvot, jotka alittavat 60, eivät ole suositeltavia. R-tekijää laskettaessa otetaan huomioon muun muassa signaalikohinasuhde, kaikkien heikentävien tekijöiden yhdistelmä, viiveen heikentävä tekijä ja laitteiston heikentävä tekijä. Kun käytetty koodekki on tunnettu, tarvitaan puheen laadun määrittämiseksi vain tiedot verkon ja sovelluksen statistiikasta. E-malli ottaa huomioon siirron statistiikan eli siirtoviiveen ja verkon aiheuttaman pakettien katoamisen. E-malli käsittelee myös puhesovelluksen ominaisuuksia, kuten koodekin laatua, koodekin kestävyyttä pakettien häviämistä vastaan ja myöhästyneiden pakettien hylkäämistä. (19.)

#### **4.3 Puheen laatuun vaikuttavat tekijät**

Kommunikointi IP-verkossa on luontaisesti epäluotettavampaa kuin piirikytkentäisessä puhelinverkossa. IP-verkko ei tarjoa verkkopohjaista mekanismeja datapakettien katoamisen eston ja oikean jakelujärjestyksen varmistamiseksi. IP-verkko on best-effort-verkko ilman perustavanlaatuisia QoS-takeita. Tämän vuoksi VoIP:n käyttöönotossa ongelmaksi voi tulla latenssin ja jitterin vähentäminen. Oletusarvoisesti IP-reitittimet käsittelevät paketteja first-come, first-served -periaatteella, eli ensin tullutta pakettia palvellaan ensin. Reitittimet, joilla on suuret määrät liikenneyhteyksiä voivat aiheuttaa latenssia, joka ylittää VoIP:lle sallitut viiverajat. LTE-verkossa radioreitti eNodeB:n ja UE:n välillä on



pääasiallisin viiveen ja pakettien katoamisen aiheuttaja. (20, s. 26.) Käyttäjätason latenssi on merkityksellinen useiden sovellusten suorituskyvyn kannalta. On useita sovelluksia, jotka eivät vaadi suuria datanopeuksia, vaan sen sijaan hyvin matalaa latenssia. Näitä ovat esimerkiksi puhepalvelut. Käyttäjätason latenssi voidaan mitata aikana, joka kuluu pieneltä IP-paketilta kulkea UE:lta verkon läpi internetpalvelimelle ja takaisin. Tätä mittausta sanotaan round-trip-timeksi. (21, s. 245.)

Äänen viive on puhelinjärjestelmästä puheeseen aiheutuva ajan viive hetkestä, jolloin puhuja sanoo sanan, siihen hetkeen, kun kuuntelija kuulee sanan. Viivettä sanotaan end-to-end-viiveeksi tai mouth-to-ear-viiveeksi. Liiallinen viive äänessä voi aiheuttaa epämiellyttävää viivettä ja puhumisen päällekkäisyyttä kaksisuuntaisissa puheluissa. Viive muodostuu maakohtaisesta verkon viiveistä, yhdyskäytävien ja muiden verkkorakenteiden aiheuttamasta viiveestä sekä jitter bufferin prosessointiajasta. IP-pohjaiselle puhelinverkolle tyypillisiä viivetyyppejä ovat etenemisviive ja käsittelyviive. Etenemisviive aiheutuu matkasta, joka signaalin tulee kulkea siirtomediassa. Käsittelyviive käsittää useita eri viiveen lähteitä, esimerkiksi puheen koodaus, pakkaus ja kytkentä, ja aiheutuu laitteista, jotka lähettävät kehyksiä eteenpäin verkossa. Pakettipohjaisissa verkoissa aiheutuu lisäksi jonotusviivettä, kun paketteja voidaan joutua siirtämään ja pitämään jonossa odottamassa siirtoa esimerkiksi verkon ruuhkaisuuden takia. Soittajat huomaavat round-trip-viiveen sen ylittäessä 250 ms:n rajan. (20, s. 18–19.)

Pakettien katoamista voi aiheuttaa esimerkiksi ylikuormitetut linkit verkossa, liialliset törmäykset tai virheet fyysisessä mediassa. Pakettien katoaminen aiheuttaa katkoksia puheluun. Puhekoodekit ottavat huomioon pakettien häviämisen mahdollisuuden, etenkin kun RTP-dataa siirretään epäluotettavan UDP-protokollan yli. Pakettien hävikki alkaa olla tilaajiin vaikuttavaa kun kadonneiden pakettien prosentuaalinen määrä ylittää tietyn kynnyksen tai kun hävikit yhdistyvät purskeiksi. Näissä tapauksissa usein parhainkin koodekki voi epäonnistua piilottamaan vaikutukset käyttäjältä ja puheen laatu heikkenee. Tämän takia on tärkeää tietää kadonneiden pakettien prosentuaalinen määrä, purskeisuus sekä

se, tapahtuuko pakettien häviäminen uplink- vai downlink-suunnassa. (20, s. 20.)

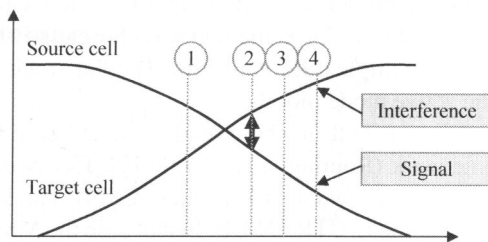
E-UTRAN-verkossa kaikki liikenne ja signalointi lähetetään jaettujen kanavien yli. Jaetut kanavat yhdessä pakettipohjaisen siirron kanssa aiheuttavat usein vaihteluja loppukäyttäjän pakettien vastaanoton ajankohdassa. Tätä viiveen vaihtelua kutsutaan viiveen jitteriksi. Viiveen jitter aiheuttaa merkittävän uhan reaaliaikaisten palvelujen palvelunlaadulle ja puhekäytössä puheenlaadulle. Jitterin lähteet voivat vaihdella. Jaetuilla kanavilla jitteriä voi ilmetä solun korkean kuormituksen takia, jolloin ajastimen pitää ajastaa useita eri tietovirtoja siirtoa varten, tai erilaisten palvelujen sekoituksesta solussa, jolloin eri tietovirroilla on erilaiset siirtovaatimukset. Jitteriä voi aiheuttaa myös alempien siirtokerrosten uudelleen lähetykset. Koska LTE:ssä tuetaan vain kovia handovereita, viiveen vaihteluita voi tapahtua myös handoverin aikana. Myös radiolinkkien hyväksymisviestit voivat aiheuttaa vaihtelua pakettien toimituksen ajastukseen UE:ssa. Viiveen jitterin ilmeneminen ei yksistään ole uhka reaaliaikaisen palvelun suorituskyvylle, vaan vaikutus palvelun laatuun riippuu jitterin suuruudesta. Yleinen ratkaisu hallita viiveen jitteriä on käyttää jitter bufferia eli eräänlaista puskuria. Puskuri on suunniteltu käsittelemään vaihteluja paketin vastaanoton ajoituksessa. Puskurin käyttö voi kuitenkin kasvattaa palvelun viivettä. (22, s. 14.)

#### **4.4 Handovereiden vaikutus puheen laatuun**

LTE:ssä tuetaan vain niin sanottuja kovia handovereita ja jokaisessa handoverissa käyttäjäkonteksti, mukaan lukien käyttäjätason paketit ja kontrollitason yhteys, pitää siirtää toisesta eNodeB:stä toiseen. Kovien handovereiden takia siirros täytyy suorittaa nopeammin ja saumattomammin kuin pehmeitä handovereita tukevissa aiemmissa radiotekniikoissa. Pakettien häviämisen minimoimiseksi lähde-eNodeB voi edelleenlähettää UE:n käyttäjätason dataa kohde-eNodeB:lle. Koska handover luo keskeytyksen käyttäjätasolla, handoverin onnistumisen ja suoritukseen kuluva aika ovat oleellisia asioita suorituskyvyn kannalta. Puheen laatuun handover-toiminteet vaikuttavat, jos paketteja häviää handoverin aikana tai jos handover aiheuttaa paljon viivettä. (23.) Koska LTE-

verkkoa tuetaan vielä vasta tietyillä pienillä alueilla, handoverien saumaton toiminta eri radiopääsyverkkoihin on erityisen tärkeää.

Nopea handover-prosessi on olennainen, kun signaalin taso kohdesolusta heikenee samanaikaisesti kun kohdesolun signaalin taso kasvaa. Näin voi tapahtua esimerkiksi kun UE menee kulman taakse. Kriittinen kohta on se, että UE:n täytyy voida vastaanottaa handover-käsky lähde-eNodeB:ltä ennen kuin signaalikohinasuhde menee liian pieneksi eli häiriöitä tulee liikaa. Ongelmaa voidaan lieventää ikkunointi- ja keskiarvoistusparametreilla ja vähentämällä verkon viivettä vastattaessa UE:n mittausraporttiin. Handover aloitetaan UE:ssa verkon määrittämien kynnyksarvojen perusteella. Sopivien kynnyksarvojen asettaminen on tärkeää handover-toiminteelle, koska hetki jolloin handover käynnistetään määrittää radio-olosuhteet handover-signaloinnille sekä lähde- että kohdesolulle. (12, s. 177; 24.) Kuva 16 esittää handoverin ajoitusta.



KUVA 16. Handoverin ajoitus (12, s. 177)

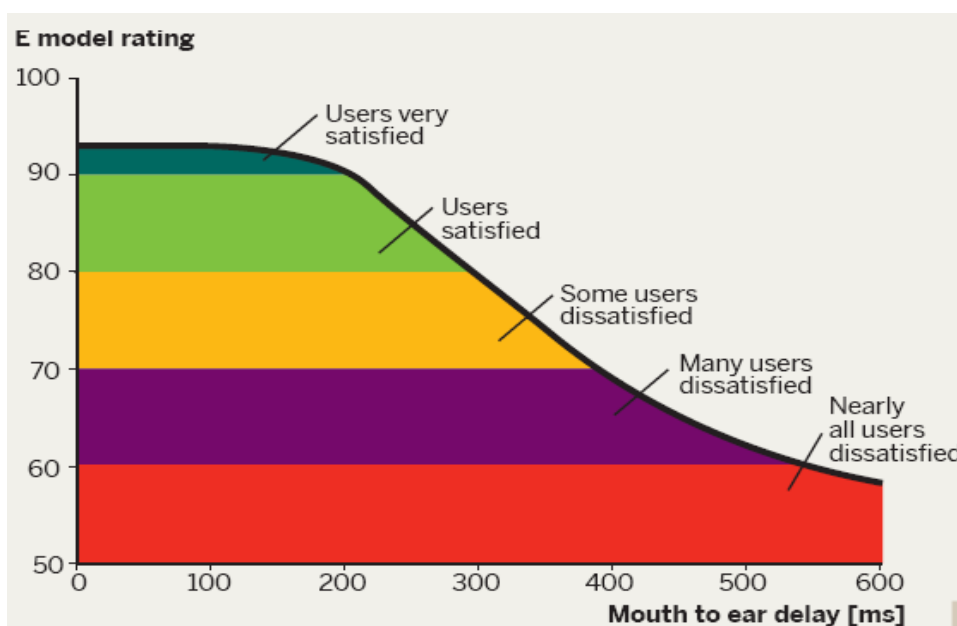
Jos kontrolli-informaation siirrossa L1-kontrollikanavilla tapahtuu virhe, aiheutuu lisäviivettä koska kontrolli-informaatio täytyy siirtää uudelleen. Osa kontrollikanavan virheskenaarioista vaikuttaa handover-signaloinnin siirtoon. Jos virhe tapahtuu UL vahvistuksen siirron aikana, UL handover signalointiviesti, esimerkiksi mittausraportti tai handoverin vahvistus, viivästyy kunnes uusi vahvistus saadaan. Samalla tavoin virheet DL-siirron toimeksiannoissa viivästävät DL handover-signaloitinta, kuten handover-komentoa. (24.)

Pakettien katoamismäärä ja viivebudjetti on otettava huomioon handovereihin käytettävissä mekanismeissa. Laadun ylläpitämiseksi eNodeB:n täytyy varmistaa, että end-to-end-viivebudjetit ja pakettien katoamismäärät ovat soveltuvia mediapaketeille. Saavuttaakseen 200 ms:n end-to-end-viiveen palveluntarjoajat

konfiguroivat eNodeB:n tyypillisiksi tavoitearvoiksi 50–80 ms. Haasteelliseksi tämän tekee se, että eNodeB:n täytyy ajastaa suuri määrä UE:ita rajallisilla ajastusresursseilla ja ottaa huomioon pakettien uudelleenlähetyksen tarve. Pakettien katoamismääriä kontrolloidaan yleensä linkinmukautuvuusalgoritmeilla, joilla voidaan varmistaa tilastollisesti, että VoIP-paketit on siirretty onnistuneesti tavoitteiden rajoissa. Handover-prosessissa on aikaväli, jolloin paketit suoralta reitillä (gatewayn ja kohde-eNodeB:n välillä) ja paketit edelleenlähetyksreitiltä (gatewayn, lähde- ja kohde-eNodeB:n välillä) voivat saapua rinnakkain kohde-eNodeB:hen. Tämä voi aiheuttaa pakettien jakelua UE:lle väärässä järjestyksessä, koska suoran reitin paketit saapuvat yleensä aiemmin kuin edelleenlähetytetyt paketit. Tällä on huono vaikutus etenkin TCP:n suorituskykyyn. (23; 25.)

#### 4.5 VoIP-vaatimukset LTE:ssä

Radioverkon täytyy täyttää korkeat vaatimukset, jotta se voi tarjota luotettavaa ja hyvälaatuista puhepalvelua. Kuva 17 esittää käyttäjätyytyväisyyden ja end-to-end-viiveen välistä suhdetta ITU-T:n E-mallin mukaisesti. Viiveen tulisi olla alle 200 ms, joka on tyypillinen 2G:n ja 3G:n piirikytkentäisten järjestelmien end-to-end-viive. Suurin sallittu end-to-end viive tyydyttävälle puhepalvelulle on 280 ms. (25.)



KUVA 17. Käyttäjätyytyväisyyden ja end-to-end-viiveen välinen suhde (25)

IMS:ää voidaan käyttää VoIP:n kontrollointiin. IMS tarjoaa QoS-informaatiota radioverkolle käyttämällä PCC:tä. Radioverkolla tulee olla algoritmit vaaditun QoS:n tarjoamiseen paremmin kuin best-effort-mallissa. QoS sisältää lähinnä viive-, virhemäärä- ja kaistanleveysvaatimukset. Puhelun katkeamismäärät ovat hyvin lähellä optimoituja GSM- tai WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) -verkkoja, parhaimmillaan alle 0,3 %. LTE:n VoIP:n tulee tarjota yhteensopivuutta piirikytkentäisten GSM/WCDMA-verkkojen puheluiden kanssa. AMR-koodekin 12,2 kbit/s:n koodauksen pakettikoko on 31 tavua, kun taas lähetyksessä käytettävän IP-headerin koko on 40–60 tavua. IP-headerin pakkaus on pakollinen vaatimus tehokaalle VoIP-ratkaisulle. IP-headerin pakkausta tarvitaan sekä UE:ssa että eNodeB:ssä. (14, s. 262.)

## 5 RUGGED DEVIATION GENERATOR

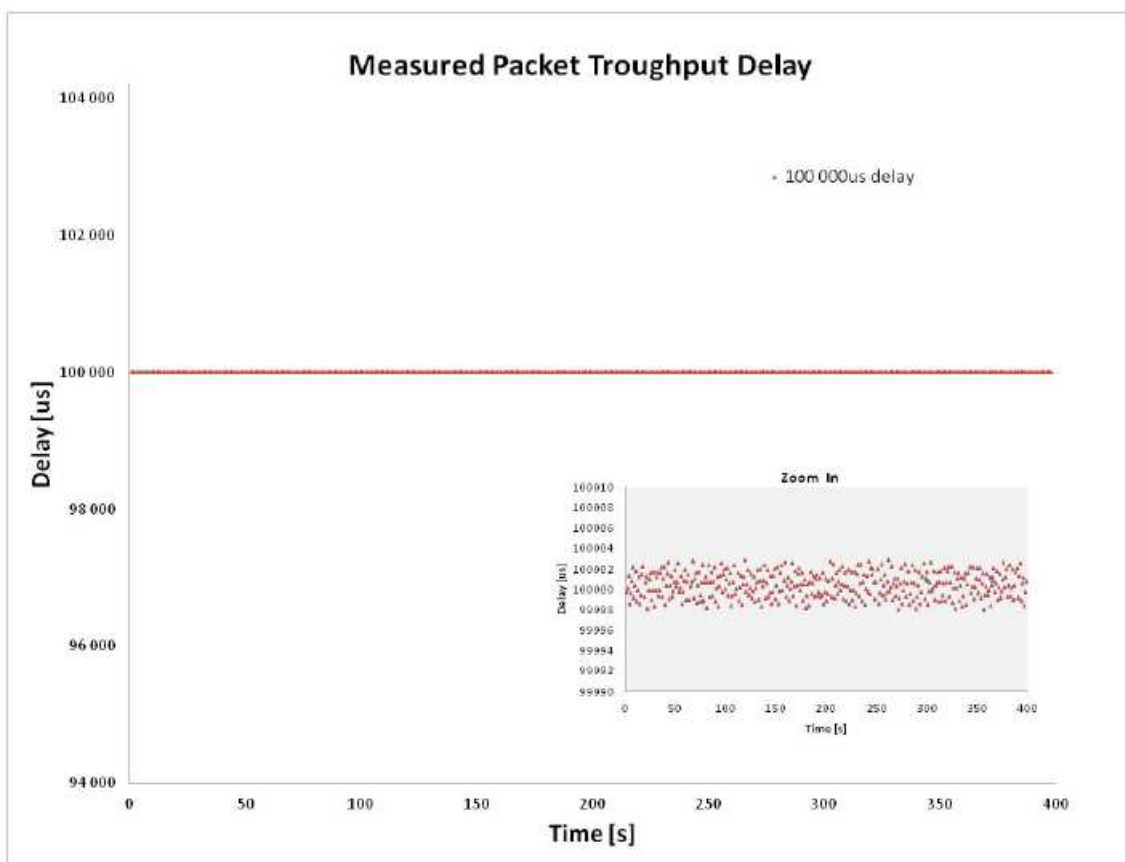
Rugged Deviation Generator (RUDE) on Rugged Tooling Oy:n kehittämä verkkoemulaattori. RUDE on suuritarkkuuksinen sulautettu verkon emulointi- ja monitorointityökalu, joka soveltuu IP-sovellusten ja laitteiden testaukseen. RUDE ei luo dataa itse, vaan viivästä ja muokkaa yksikön läpi menevää dataa. Kaksi full-duplex-porttia on varattu datan läpäisyyseen ja neljä kytkinporttia on varattu liikenteen monitorointiin ja sääntöjen konfigurointiin. Datan muokkaus RUDElla tehdään erilaisilla suodatussäännöillä. RUDEn käyttöperiaate on että dataoperaatiot annetaan yhdessä verkon suodatussääntöjen kanssa. Tämä mahdollistaa yksittäisten operaatioiden teon eri tietovirroille tai tietovirtajoukoille. Yksikkö hallitsee kymmeniätuhansia yksittäisiä suodatussääntöjä täydellä nopeudella. Sääntöjä voidaan muokata käytön aikana. RUDEn pääominaisuuksia ovat muun muassa:

- sääntökohtainen pakettien pudotus säädettävällä pudotussuhteella
- sääntökohtainen viive mikrosekunnin tarkkuudella
- sääntökohtainen jitter kahdella jakaumamallilla
- sääntökohtainen kaistan rajoitus
- sääntökohtainen virheiden luonti
- sääntökohtainen monitorointi monitorointiporteilla
- bypass-tila virrankatkos ja virhetilanteita varten. (26; 27, s. 1.)

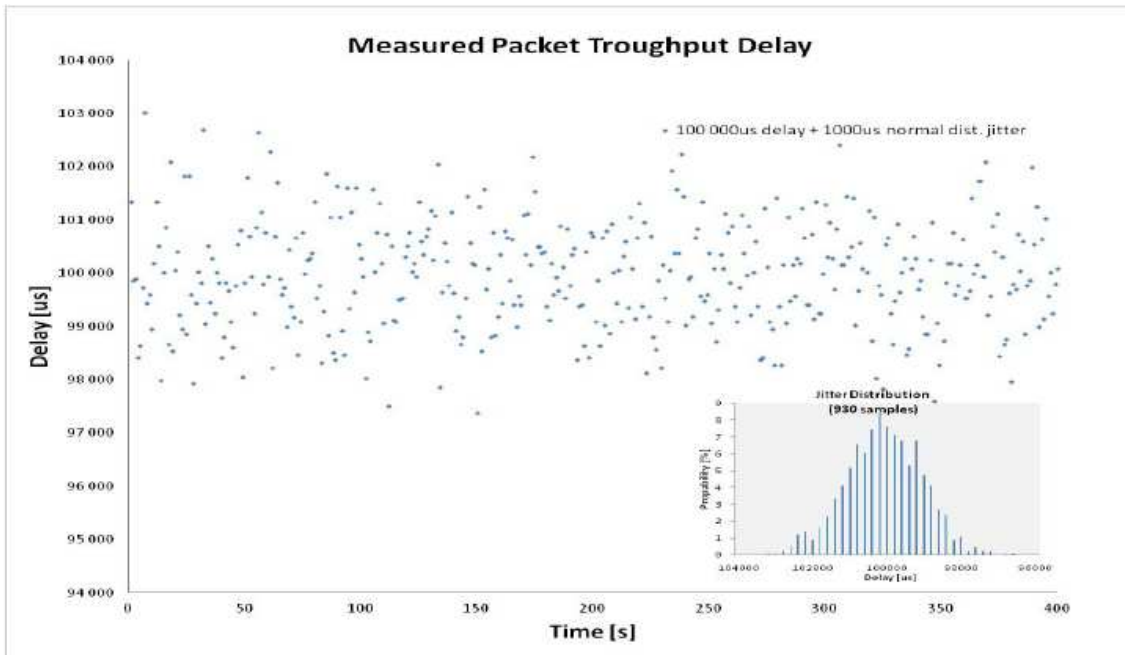
Viive-säännöllä voidaan määrittää aika, jolla pakettia viivästetään ennen kuin se lähetetään takaisin linjalle. Minimiviive on 15 mikrosekuntia, joka on sama aika kuin paketilla kestää mennä yksikön läpi. Viive tehdään viiden mikrosekunnin resoluutiolla. Viive annetaan keskiarvo- ja vaihtelu (jitter) -parametreinä. Tällä tavoin on mahdollista antaa yksittäinen tilastollinen viiveen jako esimerkiksi jokaiselle tietovirralla niin haluttaessa. Yksittäinen yksikkö voi pitää muistissa kerrallaan jopa 250 000 pakettia, mikä sallii useiden sekuntien viiveen lisäämisen koko laitteen läpi kulkevalle datalle. Viive voidaan ohittaa määritettävissä olevalle määrälle paketteja. Näin sallitaan helppo pakettien uudelleenjärjestely. (26; 27, s. 6.)

Pakettien katoaminen aiheutetaan pudottamalla paketteja annetulla intervallilla tai annetulla todennäköisyydellä. Paketteja pudotetaan myös jos asetettu kais-tanleveysraja saavutetaan. RUDElla voidaan määrittää erittäin tarkkoja paketti-en häviämisa rajoja. Virhetoiminnallisuus sallii datan korvaamisen vakiolla, satun-naisella tai bit inverted -datalla. Virheet voidaan ohittaa määritettävissä olevalle määrälle paketteja. (26.)

Tarkkuutta kuvaavat parhaiten kuvissa 18 ja 19 näkyvät kokeelliset mittaukset. Mittauksessa on lähetetty tuhat 1 kB:n UDP-pakettia per sekunti ja pakettien round-trip-time on mitattu tarkasti joka tuhannennelle paketille. Ensimmäisessä mittauksessa UDP-pakettien viive on asetettu 100 000 mikrosekuntiin. Kuva 18 esittää mittaustulosta viiveen tarkkuusmittaukselle. Lähennetyssä kuvassa voi-daan havaita 5 mikrosekunnin vaihtelu ajastimessa. Kuvan 19 mittauksessa läpimenoviive kaikille UDP-paketeille on asetettu 100 000 mikrosekuntiin ja normaalisti jakautunut jitter on asetettu 1000 mikrosekuntiin. Kuvassa 19 näkyy myös 100 000 mikrosekuntiin keskittynyt normaalijakauma. (27, s. 2.)



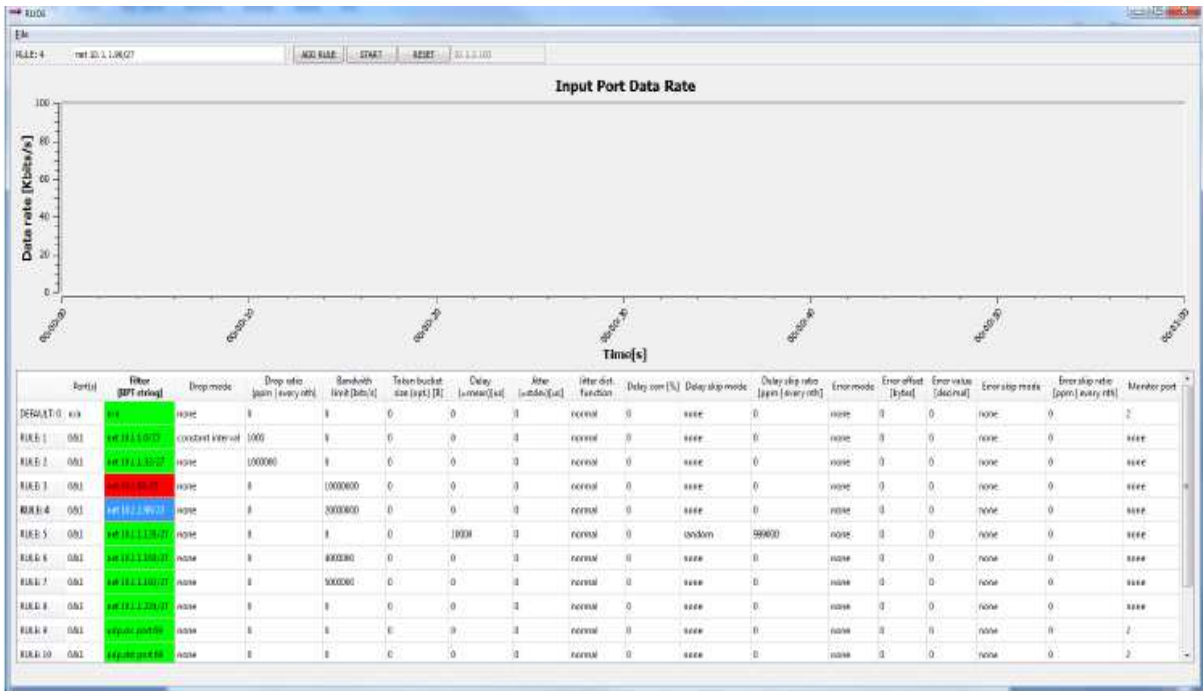
KUVA 18. Viiveen tarkkuuden kokeellinen mittaus 100 ms:n viiveellä (27, s. 3)



*KUVA 19. Jitterin jakauma 100 ms:n viiveellä ja 1 ms:n jitterillä (27, s. 3)*

Osoitteiden vaihtaminen sallii Ethernet-, IP- ja TCP/UDP-porttien osoitteiden vaihtamisen ja laitteen käytön verkon päätepisteenä. Jokaisessa säännössä data voidaan uudelleenohjata myös monitorointiporttiin. Jokaisen säännön ja portin tilastiatietoa voidaan tiedustella. RUDEa voidaan käyttää itsenäisenä testityökaluna käyttämällä sen omaa graafista käyttöliittymää (GUI) tai käyttämällä sitä komentoriviltä skripteillä. RUDE on myös mahdollista integroida osaksi olemassa olevaa testiympäristöä binary message interfacen avulla. RUDE GUI koostuu toimintonapeista, sääntökohtaisesta pakettien input-datanopeushistogrammista ja sääntöjen konfigurointitaulukosta. Kuvassa 20 RUDE GUI on konfiguroitu tietyillä säännöillä. (26; 27, s. 4.)





KUVA 20. RUDE GUI (27, s. 4)

## 6 PUHEEN LAADUN EMULOINTI

Tässä opinnäytetyössä testattiin RUDEn toimintaa VoIP-puhelujen erilaisten puheenlaatuominaisuuksien emuloinnissa ja määritettiin testisääntöjä, joita voidaan käyttää puheen laatuun vaikuttavien tekijöiden luontiin. RUDella voidaan testata puheluliikenteen QoS:ää useissa erilaisissa verkko-olosuhteissa. Puheluiden reititykseen voidaan käyttää esimerkiksi Asterisk-ohjelmistoa, jonka avulla tietokoneeseen voidaan tehdä kommunikaatioserveri. Puheluiden toteuttamiseen voidaan käyttää mitä tahansa VoIP-puhelua tarjoavaa palvelua. Tässä opinnäytetyössä käytettiin X-Lite VoIP-ohjelmistoa. Pakettien kaappaamiseen käytettiin Wireshark-pakettianalysointia. Näissä mittauksissa ei simuloita suoranaisesti LTE-verkkoa, vaan tavallista IP-verkon yli tehtävää VoIP-puhelua. Puheen laatuun vaikuttavat tekijät ovat kuitenkin samanlaisia.

### 6.1 Asterisk-serveriohjelmisto

Asterisk-ohjelmisto on Digiumin sponsoroima ilmainen, avoimeen lähdekoodiin perustuva ohjelmisto, joka muuntaa tavallisen tietokoneen kommunikointiserveriksi. Asteriskilla voidaan luoda ja ottaa käyttöön paljon erilaisia puhelinsovelluksia ja -palveluja, kuten esimerkiksi VoIP gateway ja IP PBX (Private Branch Exchange). Asterisk sisältää kaikki tarpeelliset osat PBX-järjestelmän tai käytönössä minkä tahansa kommunikaatioratkaisun luomiseen. Asteriskin ominaisuuksiin kuuluvat muun muassa ajurit useille VoIP-protokollille, tulevien puheluiden reititys ja hallinta, lähtevien puheluiden luonti ja reititys, median hallintafunktiot, transkoodaus eri mediaformaateista toiseen ja protokollan muuntaminen. (28.)

Asterisk voidaan konfiguroida IP- tai hybridi-PBX:n rungoksi, jolloin se kytkee puheluita, hallitsee reittejä, ottaa käyttöön toimintoja ja yhdistää soittajat IP-verkon yli. Asteriskilla voidaan rakentaa myös media gateway sillaksi perinteisten puhepalvelujen ja IP-puhelujen välille. Asterisk tukee suurta määrää eri protokollia puheluiden siirtämistä ja käsittelyä varten. Opinnäytetyön kannalta tärkein on SIP-protokolla. Asteriskin modulaarinen arkkitehtuuri mahdollistaa

muunnon useiden eri kommunikaatioprotokollien ja mediakoodekkien välillä. Asterisk ei tarvi lisälaitteistoa VoIP:lle. (28.)

## **6.2 X-lite-ohjelmisto**

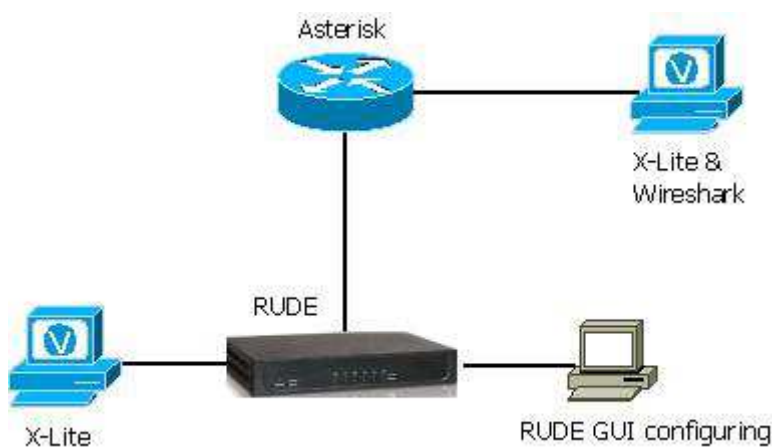
X-Lite on CounterPathin tarjoama ilmainen VoIP-ohjelmistopuhelin. X-Lite ei sisällä palvelua, vaan käyttäjällä tulee olla SIP IP-PBX tai VoIP-palveluntarjoaja, jotta X-Liteä voi käyttää. X-Litellä voidaan soittaa ääni- ja videopuheluja. Avoimet standardit ja SIP-protokollaan perustuva puheluiden signalointi mahdollistavat X-Liten toiminnan useissa eri verkoissa. X-Litessä on kaikki standardiominaisuudet, kuten puheluiden näyttö, puhelun ohjaus kaiuttimeen, mykistys, numeron uudelleenvalinta ja puhelun asetus pitoon sekä puheluhistoria. Lisäominaisuuksia ovat muun muassa automaattinen parhaan koodekin valinta toisen osapuolen valmiuksien, saatavilla olevaan kaistanleveyden ja verkon olosuhteiden perusteella sekä akustinen kaiun poisto, automaattinen vahvistuksen säätö ja puheaktiivisuuden tunnistus. (29, s. 1.)

## **6.3 Wireshark-pakettianalysaattori**

Wireshark on verkon pakettianalysaattori, jolla voidaan kaapata verkkopaketteja. Wireshark on avoimen lähdekoodin ohjelma ja saatavilla UNIX- ja Windows-käyttöjärjestelmille. Wiresharkia voidaan käyttää esimerkiksi verkko-ongelmien vianmääritykseen tai verkkoprotokollien tutkimiseen. Pääominaisuuksia ovat muun muassa pakettidatan kaappaus useista erilaisista verkkorajapinnoista, pakettien näyttö erittäin tarkalla protokollainformaatiolla, pakettien suodatus useilla eri kriteereillä, pakettityyppien korostus eri väreillä sekä pakettidatan tuonti ja vienti useista eri kaappausohjelmista. Kaappausta voidaan suorittaa myös useista erilaisista verkkolaitteista. Wireshark tarjoaa myös puheluihin liittyvää verkkotilastointia, joka vaihtelee tietyistä signalointiprotokollasta signalointi ja mediavirtojen analyysiin. Puhelufunktioilla voidaan analysoida RTP-liikennettä, etsiä VoIP-puheluita niiden signaloinnin perusteella, tehdä LTE MAC-liikenteen tilastointia ja LTE RLC -liikenteen tilastointia. (30, s. 1, 134–135.)

## 6.4 Testijärjestely ja testitapaukset

Asterisk-ohjelmisto voidaan asentaa Linux- ja Mac-ympäristöihin. Testijärjestelyssä Asterisk oli asennettu VirtualBox-virtuaalikoneeseen. Asterisk-ohjelmistossa on kaksi eri konfigurointimahdollisuutta, Linux-pohjainen konfigurointi tai testauksessa käytetty selainpohjainen konfigurointi. X-Lite-ohjelmisto asennettiin Windows-järjestelmään. RUDEn hallintaan käytettiin graafista käyttöliittymää Linux-järjestelmässä. Wiresharkilla suodatettiin Asteriskilta lähtevät paketit. X-litessä ja Asteriskissa käytettiin G711-koodekkia. Kuva testijärjestelystä esitetään kuvassa 21.



KUVA 21. Testijärjestely

Testitapaukset suunniteltiin sen mukaisesti, millaisia sääntöjä RUDElla voidaan tehdä ja mitkä asiat vaikuttavat puheen laatuun. Testitapauksia tehtiin pakettien pudotuksesta ja kaistanleveyden rajoittamisesta, viiveestä sekä viiveestä ja jitteristä.

1. Pakettien lähetykseen järjestelmän läpi ei tehdä muokkausta. Tällöin puhepakettien lähetyksessä pitäisi näkyä, että paketit tulevat tasaisesti noin 20 ms:n välein ja äänen laatu pysyy hyvänä.
2. Tehdään RUDE-emulaattorilla sääntö viiveen säätämiseksi. Käytetään delay-toimintoa määrittämään paketin viivästyksen kuluva aika. Asetetaan viive ensin 1 ms:iin, sitten kasvatetaan viivettä 10 ms:iin, 100 ms:iin ja 1000 ms:iin. 1 ms:n ja 10 ms:n kohdalla vaikutuksen puheen laatuun ei pitäisi olla kovin suuri ja tavallisesti VoIP-puheluissa 100 ms ei pitäisi

vaikuttaa kuultuun äänen laatuun kovin paljon. 1000 ms eli 1 s aiheuttaa jo ongelmia viivästäällä puhetta ja aiheuttamalla puheen päällekkäisyyttä. Jos viive kasvaa liian suureksi, puhelu yleensä katkeaa. Pakettien lähetyksessä viive näkyy yleensä "hyppäyksenä" kahden paketin aikavälillä.

3. Tehdään RUDE-emulaattorilla sekä viivettä että viiveen vaihtelua eli jitteriä. Asetetaan viive arvoon, joka ei vielä vaikuta puheluiden laatuun merkittävästi, eli 100 ms:iin. Asetetaan jitter normaalijakauman mukaiseksi. Asetetaan jitterin arvoiksi 100  $\mu$ s, 1 ms, 10 ms ja 100 ms. Liian suuret jitterin arvot aiheuttavat puheluun erilaisia muutoksia, kuten lauseista voi jäädä pois kirjaimia tai jopa sanoja.
4. Tehdään RUDE-emulaattorilla pakettien pudotusta drop-toiminnolla. Valitaan drop modeksi constant interval eli pakettien pudotus tasaisin välein. Paketteja pudotetaan 1 % ja 2 %, joten asetetaan drop ratioksi eli pakettien pudotuksen väliksi 50 ja 100. Pakettien pudotus kuuluu puheluissa äänen katkomisena ja näkyy pieninä katkoksina pakettien lähetyksen välillä.
5. Tehdään pakettien pudotusta rajoittamalla kaistanleveyttä. Testauksessa käytetty VoIP-koodekki G711 käyttää bittinopeutta 64 kbit/s, mutta nimellinen Ethernet-kaistanleveys on 87,2 kbit/s. (31.) Näin ollen kaistanleveyden rajoitus asetetaan 80 kbit/s:iin. Tämä voi aiheuttaa jonkin verran pakettien putoamista. Kun kaistanleveys rajoitetaan 70 kbit/s:iin, paketteja alkaa pudota selvästi enemmän.

## 7 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää LTE-verkossa toteutettavan VoIP-puhelun puheen laatuun vaikuttavia tekijöitä sekä tutustua RUDE-verkkoemulaattoriin ja sen pääominaisuuksiin. Mittauksissa tavoitteena oli tehdä IP-pohjaisen puheen laadun mittauksia RUDE-emulaattoria apuna käyttäen. Teorian osalta tavoite täyttyi hyvin, ja kokonaisuutena LTE-verkon kuvaus, handover-toiminteiden kuvaus ja puheen laadun kuvaus LTE VoIP-puheluissa on kattava. Mittausosiossa tavoitteeseen ei aivan päästy, koska tuloksista ei saatu halutun kaltaisia.

Työssä selvitettiin LTE:n verkkorakenne ja IMS:n oleelliset osat. LTE:n VoIP-puheluissa puheen laatuun vaikuttavat muun muassa handoverit, käytetty puhekoodekki ja verkossa aiheutuvat viiveet ja virheet. Opinnäytetyössä painoettiin tarkemmin handover-toiminteisiin.

RUDE-verkkoemulaattorilla pystyttiin luomaan erilaisia olosuhteiden muutoksia puheluun. Mittauksissa ongelmia tuotti Asterisk-ohjelmiston konfigurointi. Asteriskin konfigurointi olisi ollut kattavampaa Linux-tilassa. Nyt puhelut kiersivät Asterisk-serverin kautta ja todennäköisesti tästä syystä puheluihin aiheutui ylimääräisiä viiveitä ja katkoksia. Myös X-Lite-ohjelmistopuhelin saattoi aiheuttaa jonkinlaisen viiveen, vaikka puhelua ei muokattu.

Opinnäytetyön teon aikana opin paljon uutta. Teoriaosa oli kokonaan uutta tietoa ja välillä tiedon keruu oli todella haastavaa. Ongelmia aiheutti se, että puhepalveluja LTE:ssä ei ole vielä kokonaan toteutettu, joten mahdollisimman uuden faktatiedon löytäminen oli vaikeaa. 3GPP:n standardeja on verkossa lukuisia määriä, ja usein niissä kerrotaan asioista vain osittain, joten tietoa täytyi osata yhdistellä ja tiivistää. Mittausosiossa opin RUDE:n käyttömahdollisuuksia ja pääsin pohtimaan, millaisia sääntöjä puheluun kannattaa tehdä. Tutkin paljon myös Asteriskin konfigurointia. Teoria ja käytännön osuus eivät täysin kohdanneet, koska LTE-verkossa ja IP-verkon yli toteutettavassa puhepalvelussa on eroja.

## LÄHTEET

1. Drozdy, Árpád - Rákos, Attila - Vincze, Zoltán - Vulkán, Csaba. Adaptive VoIP Multiplexing in LTE Backhaul. Saatavissa:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5956718&tag=1>.  
Hakupäivä 20.1.2012.
2. Motorola, Inc. 2007. Long Term Evolution (LTE): A Technical Overview. Saatavissa:  
[http://www.motorola.com/web/Business/Solutions/Industry%20Solutions/Service%20Providers/Wireless%20Operators/LTE/Document/Static%20Files/6834\\_MotDoc\\_New.pdf](http://www.motorola.com/web/Business/Solutions/Industry%20Solutions/Service%20Providers/Wireless%20Operators/LTE/Document/Static%20Files/6834_MotDoc_New.pdf). Hakupäivä 15.1.2012.
3. Company, overview. Saatavissa:  
<http://www.ruggedtooling.com/company.htm>. Hakupäivä 12.5.2012.
4. Vehanen, Joonas 2011. Handover between LTE and 3G Radio Access Technologies: Test measurement challenges and field environment test planning. Espoo: Aalto yliopisto, sähkötekniikan korkeakoulu, tietoliikenne- ja tietoverkkotekniikan laitos. Diplomityö. Saatavissa:  
<http://lib.tkk.fi/Dipl/2011/urn100472.pdf>. Hakupäivä 1.3.2012.
5. Länsisalmi, Atte - Toskala, Antti 2009. System Architecture Based on 3GPP SAE. Teoksessa Toskala, Antti - Holma, Harri (toim.). LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access. John Wiley & Sons, Ltd. S. 23–66.
6. 3GPP TS 36.300, V11.0.0 2011. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2. Saatavissa:  
<http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36300.htm>. Hakupäivä 20.1.2012.
7. 3GPP TS 23.401, V10.7.0 2012. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Ra-

- dio Access Network (E-UTRAN) access. Saatavissa:  
<http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/23401.htm>. Hakupäivä 3.4.2012.
8. 3GPP TS 36.423, V10.5.0 2012. Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); X2 Application Protocol (X2AP). Saatavissa:  
<http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36423.htm>. Hakupäivä 10.4.2012.
  9. 3GPP TS 26.114 V10.3.0 2012. IP Multimedia Subsystem (IMS); Multimedia telephony; Media handling and interaction. Saatavissa:  
<http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/26114.htm>. Hakupäivä 11.4.2012.
  10. Gessner, C. - Gerlach, O. 2011. Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG. Voice and SMS in LTE White Paper. Saatavissa: [http://www2.rohde-schwarz.com/file\\_15903/1MA197\\_1e.pdf](http://www2.rohde-schwarz.com/file_15903/1MA197_1e.pdf). Hakupäivä 1.3.2012.
  11. GSMA IR.92 V4.0 2011. IMS Profile for Voice and SMS. Saatavissa:  
<http://www.gsma.com/documents/ir-92-v4-0-ims-profile-for-voice-and-sms/20169>. Hakupäivä 15.4.2012.
  12. Callender, Chris - Holma, Harri - Koskela, Jarkko - Reunanen, Jussi 2009. Mobility. Teoksessa Toskala, Antti - Holma, Harri (toim.). LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access. John Wiley & Sons, Ltd. S. 165–180.
  13. Boixadera, Francesc 2009. Radio Resource Management. Teoksessa Sesia, Stefania - Toufik, Issam - Baker, Matthew (toim.). LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice. John Wiley & Sons, Ltd. S. 301–321.
  14. Holma, Harri - Kallio, Juha - Kuusela, Markku - Lundén, Petteri - Malkamäki, Esa - Ojala, Jussi - Wang, Haiming 2009. Voice over IP. Teoksessa Toskala, Antti - Holma, Harri (toim.). LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access. John Wiley & Sons, Ltd. S. 259–281.
  15. Unuth, Nadeem. What Affects Voice Quality in VoIP Calls. Saatavissa:  
<http://voip.about.com/od/voipbasics/a/factorsquality.htm>. Hakupäivä 5.5.2012.



16. Unuth, Nadeem. What is a Codec? Saatavissa:  
<http://voip.about.com/od/voipbasics/a/codecdef.htm>. Hakupäivä 5.5.2012.
17. Järvinen, Kari - Bouazizi, Imed - Laaksonen, Lasse - Ojala, Pasi - Rämö, Anssi 2010. Media coding for the next generation mobile system LTE. Computer Communications 33, Elsevier. Saatavissa:  
[http://research.nokia.com/files/public/%5B14%5D\\_Elsevier\\_Article\\_MediaCodingforLTE.pdf](http://research.nokia.com/files/public/%5B14%5D_Elsevier_Article_MediaCodingforLTE.pdf). Hakupäivä 3.5.2012.
18. Nadeem, Unuth. Mean Opinion Score (MOS) - A Measure Of Voice Quality. Saatavissa: <http://voip.about.com/od/voipbasics/a/MOS.htm>. Hakupäivä 8.5.2012.
19. Carvalho, Leandro - Mota, Edjair - Aguiar, Regeane - Lima, Ana F. - Neuman de Souza, José 2005. An E-Model Implementation for Speech Quality Evaluation in VoIP Systems. Saatavissa:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=01493835>. Hakupäivä 8.5.2012.
20. LTE 'Real World' Performance Study 2011. Epiro Ltd. Saatavissa:  
<http://www.genremobile.com/news/LTE%20Real%20World%20Performance%20Report-Finland.pdf>. Hakupäivä 5.5.2012.
21. Holma, Harri - Kinnunen, Pasi - Kovács, István Z. - Pajukoski, Kari - Pedersen, Klaus - Reunanen, Jussi 2009. Performance. Teoksessa Toskala, Antti - Holma, Harri (toim.). LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access. John Wiley & Sons, Ltd. S. 213–257.
22. 3GPP TR 26.914 V10.0.0 2011. Multimedia telephony over IP Multimedia Subsystem (IMS); Optimization opportunities. Saatavissa:  
<http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/26914.htm>. Hakupäivä 11.4.2012.
23. Racz, Andreas - Temesvary, Andras - Reider, Norbert. Handover Performance in 3GPP Long Term Evolution (LTE) Systems. Saatavissa:  
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4299068&userType=inst&tag=1>. Hakupäivä 1.5.2012.

24. Dimou, Konstantinos - Wang, Min - Yang, Yu - Kazmi, Muhammad - Larmo, Anna - Pettersson, Jonas - Muller, Walter - Timner, Ylva 2009. Handover within 3GPP LTE: Design Principles and Performance. Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5378909>. Hakupäivä 15.4.2012.
25. Norell, Lennart - Parsons, Eric - Synnergren, Per 2010. Telephony services over LTE end-to-end. Saatavissa: [http://www.ericsson.com/res/thecompany/docs/publications/ericsson\\_review/2010/lte\\_e2e.pdf](http://www.ericsson.com/res/thecompany/docs/publications/ericsson_review/2010/lte_e2e.pdf). Hakupäivä 20.1.2012.
26. Rude Lite, Rugged Deviation Generator. Rugged Tooling Oy. Saatavissa: [http://www.ruggedtooling.com/RUDE\\_LITE\\_IN\\_BRIEF\\_v1.0.pdf](http://www.ruggedtooling.com/RUDE_LITE_IN_BRIEF_v1.0.pdf). Hakupäivä 9.5.2012.
27. Rugged Deviation Generator – User guide for Release 1.0 v1.0.3 2011. Rugged Tooling Oy.
28. About the Asterisk project. Saatavissa: <http://www.asterisk.org/asterisk>. Hakupäivä 10.5.2012.
29. X-Lite 4 for Windows, User Guide 2011. Saatavissa: [http://www.counterpath.com/assets/files/191/X-Lite\\_Windows\\_4\\_User\\_Guide\\_R2.pdf](http://www.counterpath.com/assets/files/191/X-Lite_Windows_4_User_Guide_R2.pdf). Hakupäivä 10.5.2012.
30. Lamping, Ulf - Sharpe, Richard - Warnicke, Ed. Wireshark User's Guide for Wireshark 1.7. Saatavissa: <http://www.wireshark.org/download/docs/user-guide-us.pdf>. Hakupäivä 10.5.2012.
31. Bandwidth consumption. Saatavissa: <http://www.voip-info.org/wiki/view/Bandwidth+consumption>. Hakupäivä 14.5.2012.