

Tea Rytönen

# Äänenlaadun mittaaminen

Insinööri (AMK)

Tieto- ja viestintätekniikka

Kevät 2022



**KAMK • University  
of Applied Sciences**

## Tiivistelmä

**Tekijä(t):** Rytkönen Tea

**Työn nimi:** Äänenlaadun mittaaminen

**Tutkintonimike:** Insinööri (AMK), tieto- ja viestintätekniikka

**Asiasanat:** Äänenlaadun mittaaminen, SDR, ohjelmistokehitys

Äänenlaadun mittaaminen on tärkeä osa PTT-puhetta tarjoavien ohjelmistoradioiden ja aaltomuotojen kehitystä. Ilman äänenlaadun mittaamista ja sen tarkkailua ei ole takuuta ohjelmistoradion toiminnan luotettavuudesta, sillä olennainen osa ohjelmistoradion toiminnasta on kuljettaa ääntä toiseen ohjelmistoradioon. Jotta vastaanottaja saisi selkeyden siitä, mitä lähettävässä päässä oleva puhuja puhuu, on äänenlaadun oltava hyvä. Aistinvarainen äänenlaadun mittaaminen on epätarkkaa ja työlästä, täten tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia erilaisia äänenlaadun mittaamisen menetelmiä tämän korvaamiseksi ja valita niistä sopivin kokeiluun toistettavien ja tarkkojen tulosten saamiseksi.

Tässä opinnäytetyössä tuotiin esille erilaisia äänenlaadun mittaamisen menetelmiä SDR-radioon ja kerrottiin niiden toiminnallisuudesta. Keskeisinä äänenlaadun mittaamisen menetelminä tässä työssä tulivat PESQ (Perceptual Evaluation of Speech Quality) ja POLQA (Perceptual Objective Listening Quality Analysis).

Työhön valitun mittausmenetelmän avulla työn tuloksina saatiin hyviä arvoja äänenlaadun mittauksista. Näitä tuloksia vertailtiin erilaisilla vaimennuksilla saatuihin tuloksiin, jotta selvisi, kuinka äänenlaatu muuttui kuuluvuuden heikentyessä.

Työ onnistui hyvin, vaikkakin muutamia ennalta-arvaamattomia vastoinkäymisiä tuli vastaan työtä tehdessä, mitkä hidastivat työn kulkua. Äänenlaadun mittaamisen erilaisia menetelmiä on tullut tutkittua ja äänenlaatua saatiin mitattua, mitkä olivat keskeiset asiat, mitä tässä työssä oli tarkoitus saada tehtyä.

## **Abstract**

**Author(s):** Rytkönen Tea

**Title of the Publication:** Measuring Sound Quality

**Degree Title:** Bachelor of Engineering, Information and Communication Technology

**Keywords:** measuring speech quality, SDR, software development,

Measuring sound quality is an important part of radio development. Without measuring the sound quality, there is no guarantee that the radio will operate reliably, as sending sound to another radio is an essential function in a radio. For the receiver to have clarity about what the transmitting end brings, the sound quality must be good. Measuring the sound quality by one's own hearing is inaccurate and laborious, thus the purpose of this thesis was to study different methods of measuring sound quality and to select the most suitable one for the experiment to ease the workload and to obtain accurate results.

In this thesis, different methods of measuring sound quality are presented and their functionality is described. The essential sound quality methods that were decided to be brought up in this work are PESQ (Perceptual Evaluation of Speech Quality) and POLQA (Perceptual Objective Listening Quality Analysis).

Good values were obtained as the results from sound quality measurements. These results were compared with those obtained with different attenuations to see how the sound quality changes as the hearing decreases.

The work went well, although a few unpredictable obstacles were encountered while working, which slowed down the progress of the work. Various methods for measuring sound quality have been researched and the sound quality has been successfully measured and those were the main things that were to be done in this work.

## Sisällys

1	Johdanto .....	1
2	Katsaus ilmiöön & Työympäristön kuvaus.....	2
2.1	Työn kuvaus.....	2
2.2	Yleistä SDR-radioista .....	2
2.3	Bittium Tough SDR -tuoteperhe .....	3
2.3.1	Arkkitehtuuri .....	4
2.3.2	Aaltomuoto .....	4
2.3.3	Audio .....	5
3	Äänenlaadun mittaaminen .....	7
3.1	Yleistä .....	7
3.2	Mittausmenetelmät .....	7
3.2.1	PESQ-algoritmin kuvaus .....	8
3.2.2	POLQA-algoritmin kuvaus .....	12
3.2.3	BER-testauksen kuvaus .....	13
4	Opinnäytetyön vaiheet .....	15
4.1	Suunnittelu .....	15
4.2	SDR-laitteen käyttöönotto .....	17
4.3	PESQ:n käyttäminen .....	18
4.4	Saatujen tulosten arviointi .....	18
5	Arviointi ja pohdinta .....	20
6	Yhteenveto .....	21
6.1	Johtopäätökset .....	21
6.2	Jatkokehitysideat.....	21
	Lähteet .....	23
	Liitteet	

## Termit ja lyhenteet

BER	Bit Error Rate. Bittivirhesuhde
ITU	International Telecommunication Union. Yhdistyneiden kansakuntien tieto- ja viestintäteknologian erikoisvirasto
ITU-T	ITU Telecommunication Standardization Sector. ITU-standardien koordinointisektori
MOS	Mean Opinion Score. Mitta laadun tarkkailuun
PESQ	Perceptual Evaluation of Speech Quality. Algoritmi äänenlaadun mittaamiseen
POLQA	Perceptual Objective Listening Quality Analysis. Algoritmi äänenlaadun mittaamiseen, PESQ:sta kehittynyt uudempi versio
PSQM	Perceptual Speech Quality Measure. Algoritmi äänenlaadun mittaamiseen, PESQ:n edeltäjä
PTT	Push-To-Talk. Vuorosuuntainen kommunikaatiomenetelmä
SDR	Software Defined Radio. Ohjelmistoradio, jonka toimintaa on mahdollista muokata ohjelmiston avulla
SINR	Signal to Interference & Noise Ratio. Yhteyden eheyden mitta
SSH	Secure Shell Protocol, etähallintaprotokolla, jolla käyttäjä voi käyttää, hallita ja muokata etäpalvelintään internetin kautta [1]
VoIP	Voice Over IP. Puheen siirtäminen internet-yhteyden kautta [2]

## 1 Johdanto

Opinnäytetyöni aiheena on äänenlaadun mittaaminen ja tämän työn toimeksiantajana toimii Bittium Wireless -niminen yritys. Bittium on erikoistunut luotettavien ja turvallisten viestintä- ja liitettävyyssratkaisujen kehittämiseen. Yritys tarjoaa innovatiivisia tuotteita ja palveluita, tuotealustoihinsa perustuvia ratkaisuja ja tuotekehityspalveluita sekä korkealaatuisia tietoturvaratkaisuja mobiililaitteisiin ja kannettaviin tietokoneisiin [3]. Bittiumin tuotteisiin kuuluvat mm. taktiset SDR-radiot, jotka ovat tarkoitettuja taktiseen tiedon siirtoon, joihin kuuluu muun muassa PTT-puhe (Push-To-Talk). Näiden SDR-radioiden laadun takaamiseksi äänenlaadun tarkkailu on tärkeää.

Tähän mennessä Bittiumilla ohjelmistoradioiden äänenlaatua on arvioitu aistinvaraisesti kuuntelemalla ohjelmistoradion kautta tulevaa ääntä. Äänenlaadun aistinvarainen testaus on työlästä eikä siitä saa riittävän tarkkaa tulosta, vaan arvion siitä, mitä se saattaisi olla. Sopivan menetelmän löytäminen äänenlaadun mittaamiseen on tärkeää luotettavuuden sekä toistuvien tarkkojen tulosten saamiseksi. Jatkokehitysmahdollisuutena tälle työlle olisi testiautomaatio äänenlaadun mittaamiselle, mikä helpottaisi työtä vielä enemmän.

Tämä aihe opinnäytetyölleni tuli suoraan ehdotuksena työnantajalta ja kiinnostuksen tästä aiheesta minulle herätti se, että olen jo päässyt hieman työskentelemään Bittiumilla ohjelmistoradiokeskeisissä töissä. Vaikka äänenlaadun mittaaminen olikin minulle melkein tuntematon käsite, tämä aihe vaikutti mielenkiintoiselta ja sellaiselta, minkä minä uskoin saavani toteutettua. Kiinnostus minulla tähän aiheeseen heräsi myös sen takia, kun minulla ei ole paljon älykkäisiin järjestelmiin perustuvaa tietoa perusteiden lisäksi, niin halusin kehittää itseäni.

Tässä opinnäytetyössä tuodaan esille, miten äänenlaatua voidaan mitata ohjelmistoradioissa ja kuinka mittaaminen tapahtuu. Opinnäytetyön tavoitteena on mitata äänenlaatua valitulla menetelmällä kahden ohjelmistoradion välille muodostuneen radiolinkin yli. Tavoitteisiin pääsee, kun ohjelmistoradioon valitulla äänenlaadun mittaamisen menetelmällä on saatu toistettavia tuloksia aikaan.

## 2 Katsaus ilmiöön & Työympäristön kuvaus

Opinnäytetyöni tarkoituksena on analysoida äänenlaadun mittaamisen menetelmiä ja soveltuvuutta Bittium Tough SDR -radioissa aaltomuodon yli kulkevan äänen laadulliseen mittaamiseen.

### 2.1 Työn kuvaus

Työn lähtökohtana on ollut se, että tähän mennessä äänenlaatua on mitattu aistinvaraisesti ohjelmistoradiosta tulevaa ääntä arvioimalla. Tämä mittaamismenetelmä ei ole luotettavin vaihtoehto, sillä arviointi henkilöittäin ja eri testikertojen välillä poikkeavat toisistaan. Tämän menetelmän huonoja puolia on myös se, että se on erittäin työlästä äänenlaadun mittaamiseen.

Ohjelmistoradioon valitun menetelmän evaluointi äänenlaadun mittaamiseen tulee tuomaan nopeita tuloksia, jotka perustuvat toistuvaan samanlaiseen arviointiin, joten äänenlaadun muutoksen seuraaminen on tarkempaa. Työn tarkoituksena on tutkia äänenlaadun mittaamista ja toteuttaa sovellus mittaamaan äänenlaatua Tough SDR -radiossa.

### 2.2 Yleistä SDR-radioista

SDR (Software Defined Radio), toiselta nimeltään ohjelmistoradio on radioviestintäjärjestelmä, jonka ohjelmistoa käytetään radiosignaalien modulointiin ja demodulointiin [4].

SDR-ohjelmistoradiota voidaan konfiguroida tai määrittää kokonaan ohjelmistolla. Alustaa voidaan hyödyntää useaan eri tarkoitukseen ja ohjelmistokonfiguraatiota muuttamalla radion toimintaa muuttaa tarkoitukseen sopivaksi. SDR-radion toimintaa voidaan myös muuttaa tuomalla ohjelmistopäivityksiä. [4.]

## 2.3 Bittium Tough SDR -tuoteperhe

Bittiumin Bittium Tough SDR Handheld™ ja Vehicular™ (Kuvassa 1) ovat seuraavan sukupolven ohjelmistolla määriteltäviä taktisia ohjelmistoradioita. Handheld™ on käytettävissä muun muassa jalkautuville sotilaille, kuten ryhmän tai joukkueen johtajalle, kun taas Vehicular™ soveltuu käytettäväksi muun muassa telaketjuilla tai renkailla kulkeviin ajoneuvoihin. Ohjelmistoradioilla on mahdollista tuoda laajakaistainen tiedonsiirto ja ääni liikkuville sotilaille eri puolilla taistelukenttää. Ohjelmistoradioilla erityistä on niiden ainutlaatuisen laaja taajuusalue, mikä ylittää 30–2500 MHz taajuuksille. Tämä laaja taajuusalue parantaa mahdollisuuksia oikeassa taistelutilanteessa selviytymiseen. [5.]



Kuva 1. Bittium Tough SDR Vehicular™(vasemmalla) ja Handheld™(oikealla) [6]



Bittium Tough SDR™:llä joukot voivat kommunikoida turvallisesti kapea- ja laajakaistaisten aaltomuotojen kautta. Yrityksen mukaan tämä ohjelmistoradio voi joustavasti käyttää parhaiten sooriutuvaa aaltomuotoa ottaen huomioon olosuhteet ja tehtävän. [5.]

### 2.3.1 Arkkitehtuuri

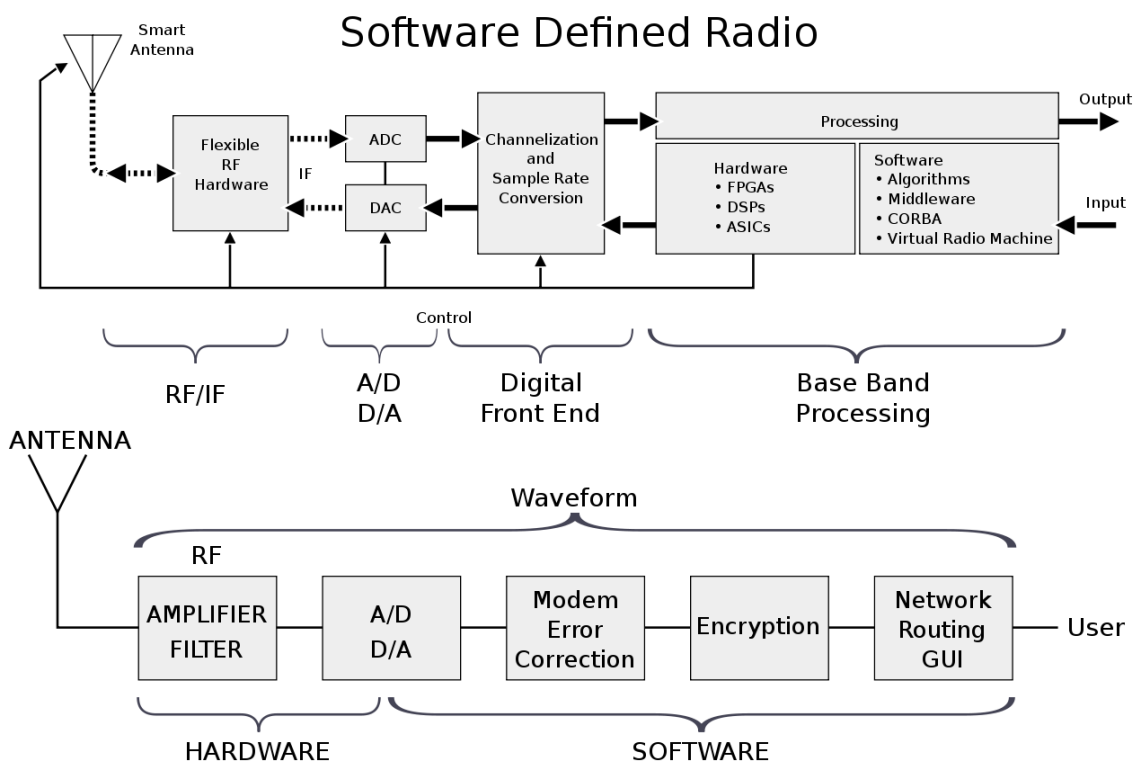
Bittium Tough SDR™ perustuu arkkitehtuuriltaan puna-/musta arkkitehtuuriin [6]. Puna-/musta arkkitehtuurissa systeemin toiminta jaotellaan tietoturvasyistä kahteen osioon: punaiseen ja mustaan puoleen [7]. Punaisella puolella käsitellään salaamatonta tietoa, joka salataan ennen tiedon siirtämistä mustalle puolelle [7]. Musta puoli käsittelee kaikkea dataa julkisena, eli data on joko salattu tai ei tarvitse salausta. Puna-/musta arkkitehtuurissa näiden kahden osan väliin on yleensä kehitelty muun muassa palomuuuri.

Tässä työssä olennaisena osana tästä arkkitehtuurista ovat punainen puoli sekä punaisella puolella oleva sandbox. Sandboxilla tarkoitetaan käyttäjälle suunniteltua alustaa, joka mahdollistaa käyttäjälle omien applikaatioiden kehittelyn.

### 2.3.2 Aaltomuoto

Sanana aaltomuoto voi tarkoittaa kahta eri asiaa, joko itse äänen värähtelyä ajan mittaan, joka tekee aaltomaista liikettä tai ohjelmistoradion tapauksessa sen toimintaa. Tässä työssä aaltomuotoa kuvataan SDR-radion toimintona. Kaikki, mitä kuvataan radiosignaaleiksi, liittyy aaltomuodon käsitykseen: muun muassa signaalin tuottaminen, modulaatio ja suodatus ovat kaikki erilaisia radiotoiminnan komponentteja, jotka tuodaan yhteen käsitteeksi aaltomuoto [8].

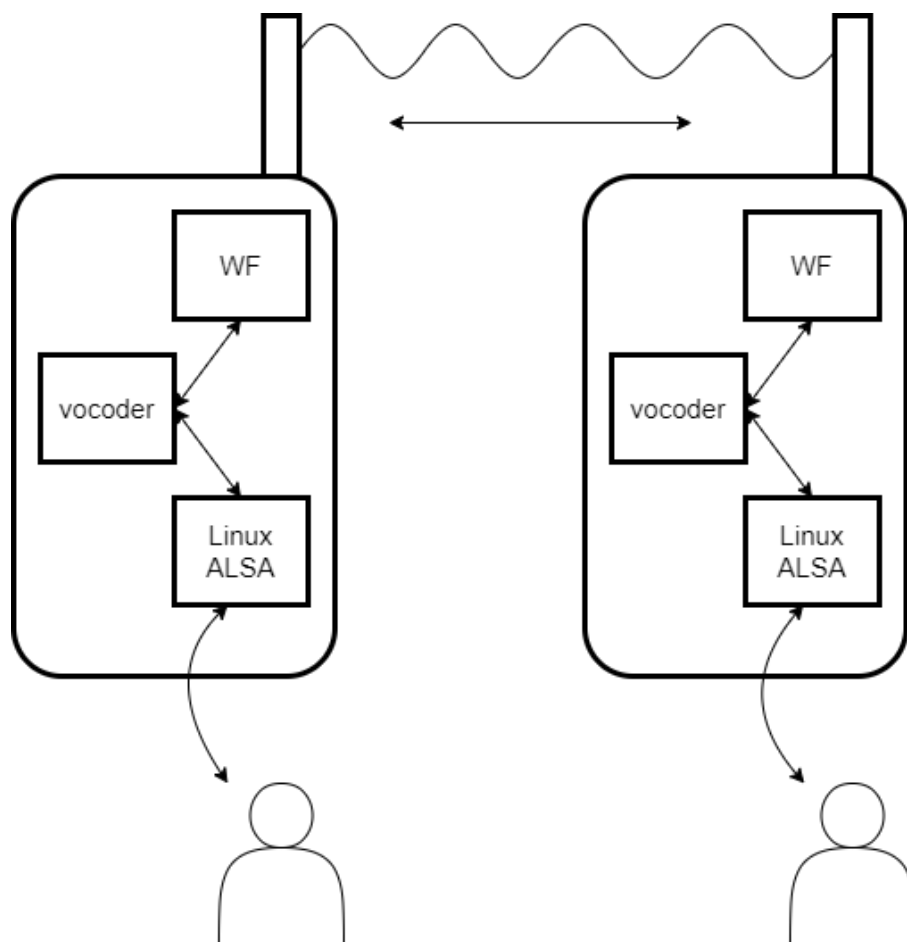
Alla tarkentavampaa kuvaa siitä, mistä aaltomuoto (Waveform) muodostuu SDR-arkkitehtuurissa (Kuva 2). Aaltomuoto koostuu niin ohjelmistosta kuin laitteistosta yhdessä.



Kuva 2. SDR-laite, aaltomuoto ja sen sisältävät osat [9]

### 2.3.3 Audio

Bittiumin Tough SDR -radioiden välillä kulkeva ääni aloittaa matkansa käyttäjän painaessa PTT-nappia (Push-To-Talk tangent) ja syöttämällä ääntä ohjelmistoradion mikrofonin kautta. Tämä PTT-nappi on siis toiminnaltaan sellainen osa ohjelmistoradiota, mitä pitämällä pohjaan painettuna ääntä lähetetään toiseen ohjelmistoradioon. Seuraavassa kuvassa (Kuva 3) näytetään tarkemmin Bittium Tough SDR -radioiden välissä kulkevan äänen matkaa.



Kuva 3. Äänen matka Bittium Tough SDR -radiosta toiseen

Ääni kulkee napin painalluksen jälkeen Linuxin ALSA-äänirajapintaan (Advanced Linux Sound Architecture), joka vastaa äänen antamisesta moderneille Linux-versioille. ALSA on osa Linuxin ydintä ja tarjoaa äänitoimintoja järjestelmälle sovellusohjelmointirajapinnan (application programming interface, API) kautta äänikortin laiteajureille. [10.]

Äänen matka jatkuu ALSA:sta vocoderiin, missä analysoidaan modulaattorisignaalin ääni. Signaali jaotellaan moneen taajuusalueeseen. Kaistojen taso lähetetään vastaavalle kaistanpäästösuodattimelle signaalina. Äänilähde sen jälkeen lähetetään suodatinpankin läpi ja jokaisen kaistanpäästösuodattimen taso säädetään automaattisesti vastaavan modulaattorisignaalin taajuuden tasolle. [11.]

ALSA:n ja vocoderin jälkeen matka jatkuu aaltomuodolle. Aaltomuodon kautta ääni siirtyy signaalina toiseen ohjelmistoradioon edellistä päinvastaisessa järjestyksessä. Lopulta ääni tulee ALSA:n kautta vastaanottajalle.

### 3 Äänenlaadun mittaaminen

#### 3.1 Yleistä

Äänenlaadun mittaaminen on ollut käytössä jo vuodesta 1996 PSQM (Perceptual Speech Quality Measure) avulla muun muassa ohjelmistoradioiden testauksessa. Ohjelmistoradioiden keskeinen käyttötarkoitus on lähettää ja vastaanottaa ääntä toisesta laitteesta, joten äänenlaadun testaaminen on niissä erittäin tärkeää, jotta vastaanottaja kuulee mahdollisimman selkeästi puhujan äänen.

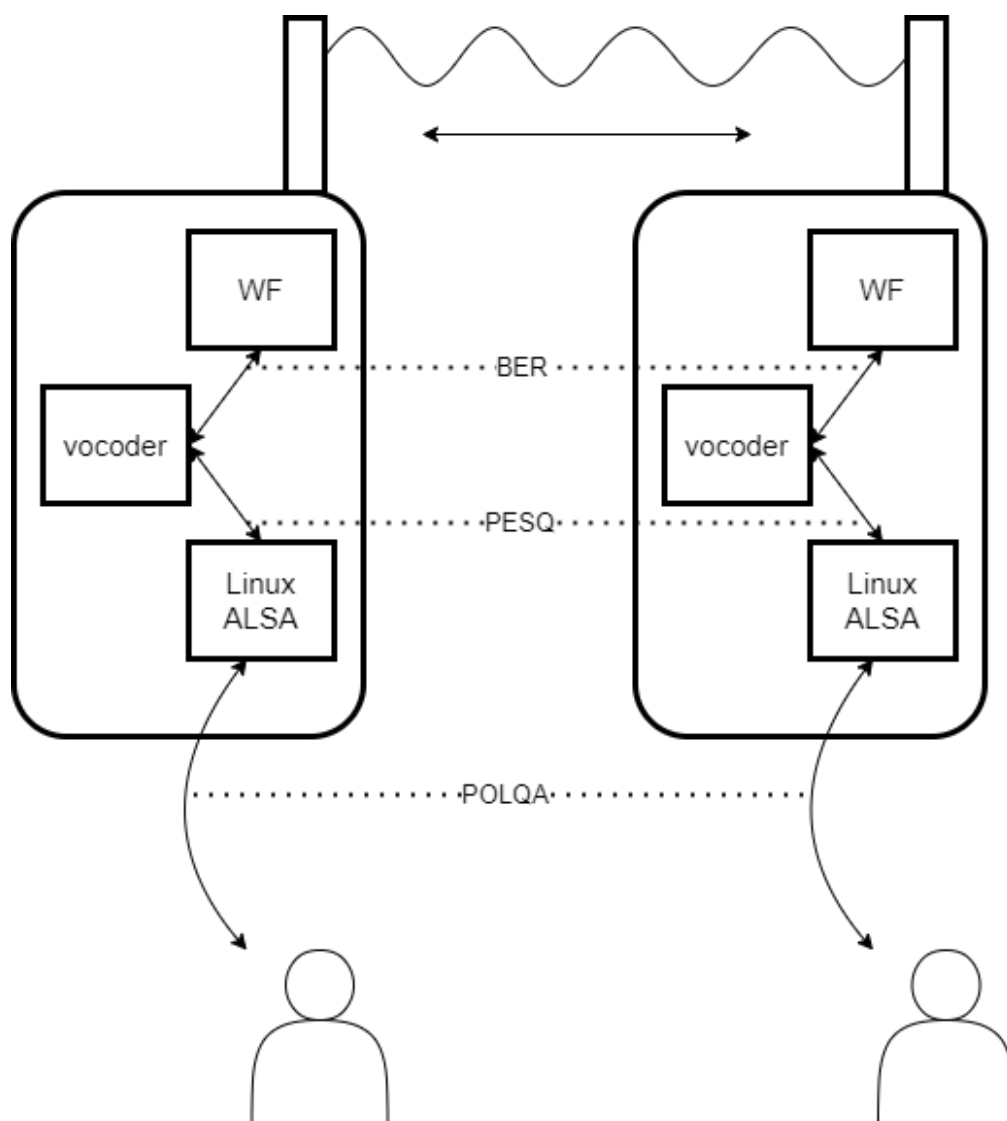
Huonon äänenlaadun kohdatessa vastaanottajalla on hankaluuksia saada selvää siitä, mitä hänelle yritetään kertoa. Tämän takia keskustelu saattaa kestää kauemmin, sekä molemmat osapuolet ovat erittäin turhautuneita, kun he eivät saa tarkkaa selvyyttä puhutusta asiasta.

Äänenlaadun seuranta on erittäin tärkeää varsinkin armeijassa käytettävässä radiokommunikaatiossa. Mahdollisen tilanteen tullen, se kuinka sotilas kuulee tulevat käskyt, tekee tilanteesta kriittisen. Huonot äänenlaadut aiheuttavat hämmennystä, eivätkä ole kenellekään hyödyllisiä, täten pyritään säilyttämään ääni mahdollisimman laadukkaana hankalissakin olosuhteissa.

Äänenlaatu voi heikentyä ja kadota monenlaisesta syystä. Ohjelmistoradioiden kannalta tämä voi johtua kahden osapuolen välisestä radiopuhelusta, joka kulkee usean radiohypyn yli. Tämä tarkoittaa, että välissä on useampi ohjelmistoradio, joka välittää ääntä ketjumaisessa muodostelmassa toisilleen ja kullakin näistä voi olla eri kapasiteetit ja radioyhteydet.

#### 3.2 Mittausmenetelmät

Äänenlaadun mittausmenetelmiä on useita erilaisia ja seuraaviin lukuihin olen jaotellut muutamia niistä. Kuvassa 4 on hieman tarkennusta siitä, miten erilaisiin paikkoihin äänen lähettämisessä nämä menetelmät sijoittuvat arkkitehtuurillisesti. Kuvan periaatteena on sama äänen kulkeminen kuin jo aiemmassa kuvassa (Kuva 3), esitystapa vain on hieman erilainen mittausmenetelmien takia.



Kuva 4. Erilaiset mittausmenetelmät ja niiden sijoittuminen äänen lähetyksessä

### 3.2.1 PESQ-algoritmin kuvaus

PESQ (Perceptual Evaluation of Speech Quality) on ITU-T:n vuonna 2001 standardisoitu algoritmi, jota käytetään puheen laadun mittaamiseen. ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) koordinoi televiestinnän ja tietoliikennetekniikan standardeja. ITU-T:n on tarkoitus muun muassa varmistaa, että kaikki standardit, jotka kattavat televiestinnän ja tietoliikennetekniikan alat tuotetaan tehokkaasti ja oikea-aikaisesti. [12.]

Spearline on globaali yritys, joka auttaa asiakkaitaan diagnosoimaan ja selvittämään puhelinlinja-ongelmia. Heillä on tarkka selitys PESQ:sta ja siitä, miten hyvän ja huonon äänenlaadun erottaa,

sillä yritys käyttää PESQ:a maailmanlaajuisessa numerotestaamisessa. Tämä objektiivinen ja tunnistettu alan standardin mukainen äänenlaatumittaus, PESQ, ottaa huomioon seuraavat ominaisuudet:

1. Äänen terävyyden
2. Puhelun voimakkuuden
3. Taustamelun
4. Äänen vaihtuvan latenssi tai viiveen
5. Äänen leikkaantumisen
6. Äänihäiriöt [13.]

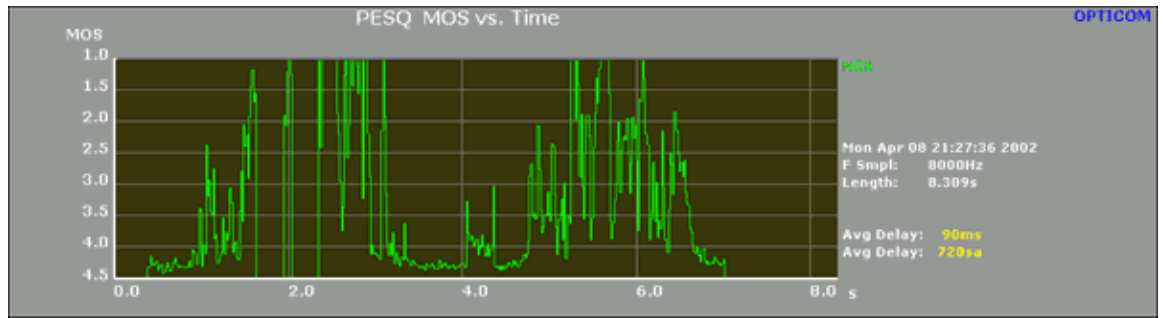
Testi vertaa ääntä (puhelinlinjan kuuntelijan päässä) alkuperäiseen äänitiedostoon (joka toistetaan puhujan puolella) luodakseen täysin puolueettoman ja objektiivisen indikaattorin äänenlaadusta. Tämä on tarkempi kuin muut äänenlaadun mittausmenetelmät, jotka usein perustuvat verkon suorituskykyyn perustuviin äänenlaadun ennusteisiin. [13.]

PESQ palauttaa testistä tuloksena pistemäärän 1–4,5, joista korkeammat pisteet kertovat paremmasta laadusta. Kuvassa 5 nähdään, millaisia tuloksia PESQ:n avulla voidaan saada. Yksinkertaisuudessaan se antaa mittauksesta MOS arvon ja PESQ:n oman MOS-arvon, sekä lisäksi tarkempia teknisiä arvoja.



Kuva 5. Esimerkki PESQ-tuloksista [14]

Kuvassa 6 näytetään graafinen kuvaaja siitä, miten MOS-arvoja annetaan ajan kuluessa. Tällaisten mittausarvojen saaminen auttaa tarkentamaan sitä, millä ajanhetkellä ääni on mahdollisesti heikentynyt.



Kuva 6. PESQ MOS -pisteet ajan kuluessa [14]

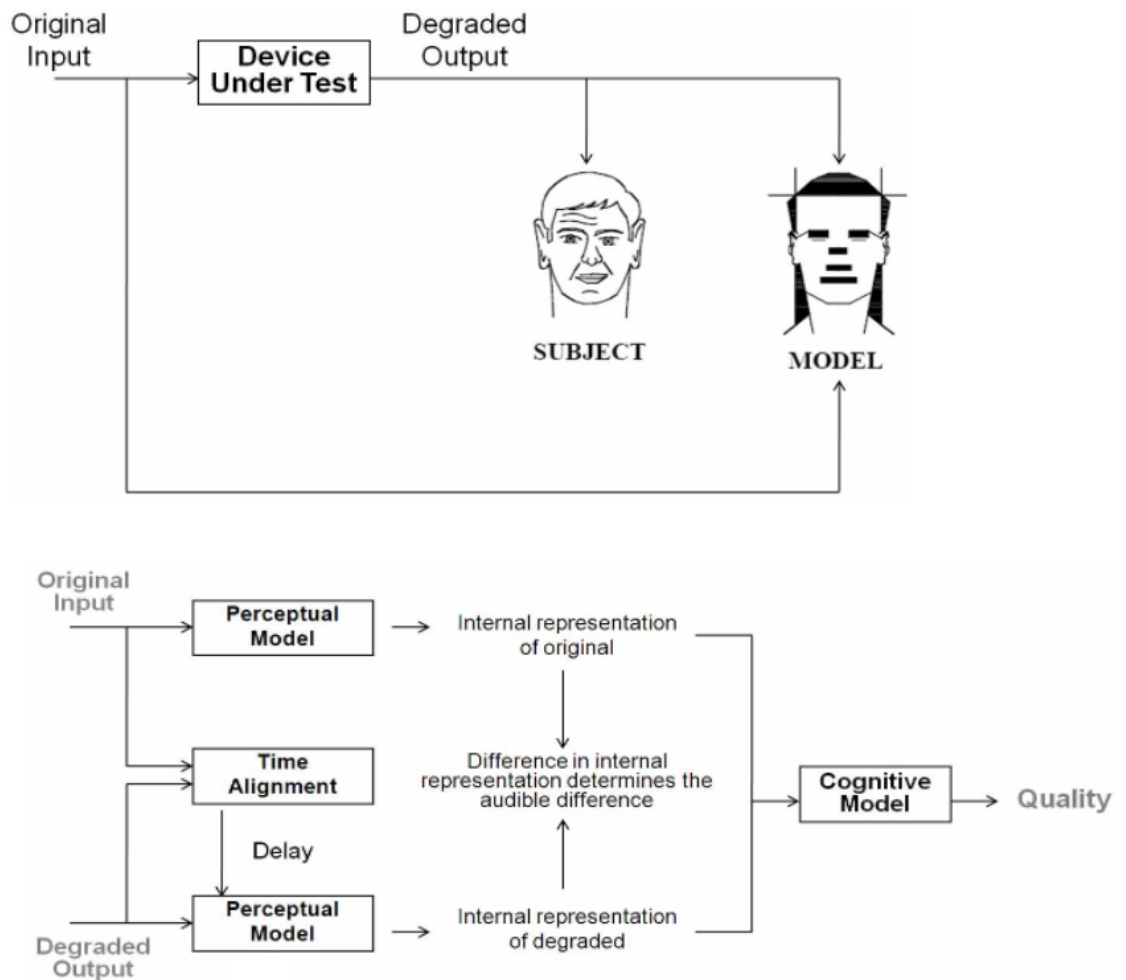
Seuraavassa kuvassa (Kuva 7) huomataan, kuinka pisteet on jaettu kuuteen eri ryhmään ja kuinka ne jakautuvat MOSin mukaisesti. Kuvassa nähdään myös, kuinka PESQ:n MOS-arvot ovat verrattavissa suhteellisen samanlaiset, kuin MOS-arvot yleensä.

MOS	Quality	Impairment	User Satisfaction	MOS
5	Excellent	Imperceptible	Very Satisfied	4.4
4	Good	Perceptible but not annoying	Satisfied	4.3
3	Fair	Slightly annoying	Some Users Dissatisfied	4.0
2	Poor	Annoying	Many Users Dissatisfied	3.6
1	Bad	Very annoying	Nearly All Users Dissatisfied	3.1
			Not Recommended	2.6
				1.0

Kuva 7. PESQ-pisteiden määrittely [15]

Näitä arvoja tarkkailemalla voidaan olla varmoja, että kuuntelija vastaanottavassa päässä voi turhautua puhelusta, jos hän kokee puhelun äänenlaadun olevan tasoa 1,0–2,0. Molempien osapuolten välinen keskustelu olisi siis tässä tapauksessa täysin mahdotonta. Keskustelut, jotka ovat pistemäärältään vielä alle 3, parantaisivat laatua hieman, mutta tämäkin taso voi edellyttää

tarpeen vaatiessa puheen toistamisen ehdottamista. Kuvasta 8 nähdään tarkemmin, kuinka PESQ käytännössä toimii.



Kuva 8. Yleiskatsaus PESQ:n toimintaan [15]

PESQ vertaa alkuperäistä signaalia heikentyneeseen signaaliin, mikä seuraa siitä, että se kiertää viestintäjärjestelmän kautta. PESQ:n palauttava tulos on arvioitu ennuste äänenlaadusta.

PESQ:n ensimmäisessä vaiheessa lasketaan sarja viiveitä alkuperäisen tulon ja heikentyneen lähdön välillä, yksi kullekin aikavälille, joiden viive eroaa merkittävästi edellisestä ajasta. Jokaiselle aikavälille lasketaan vastaava aloitus- ja lopetuspiste. Algoritmi perustuu ITU:n PESQ-dokumentin mukaan periaatteeseen, jossa verrataan kahden viiveen luotettavuutta tietyllä aikavälillä, jotta tälle ajanjaksolle on yksi viive. Algoritmi pystyy käsittelemään viiveen muuttumista sekä hiljaisuuden että aktiivisten puheosien aikana. [16.]

Löytyneiden viiveiden perusteella PESQ vertaa alkuperäistä signaalia laitteesta ulostulevaan heikentyneeseen signaaliin käyttämällä kuvan 8 havaintomallia. Keskeistä tähän prosessiin on sekä

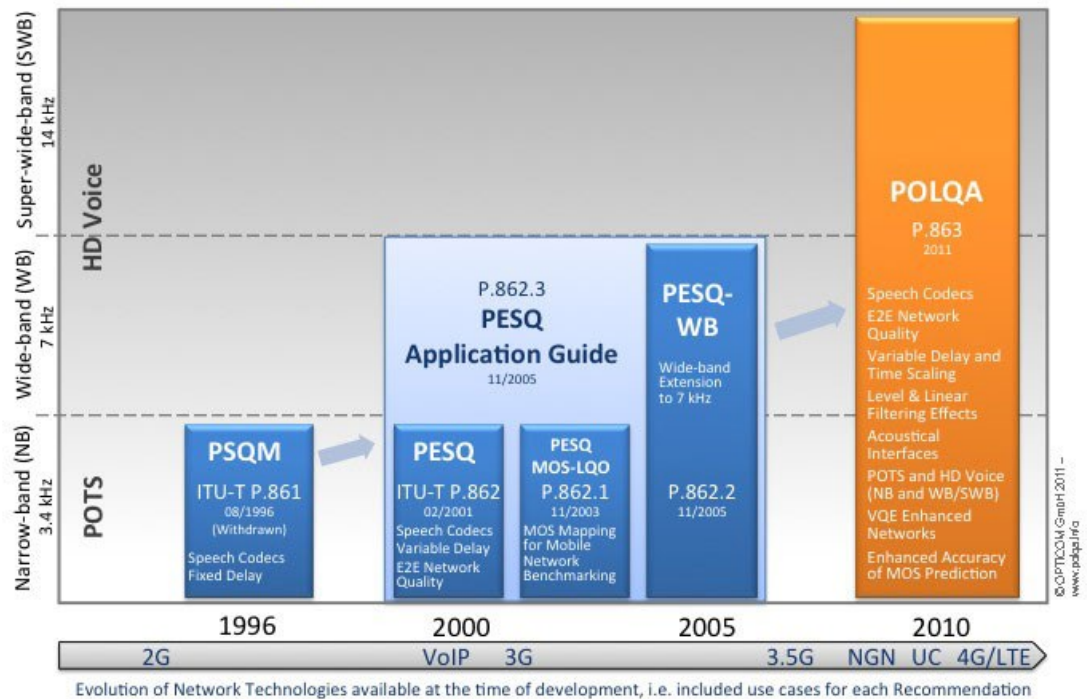


alkuperäisen että heikentyneen signaalin muuntaminen sisäiseksi kuvaukseksi. Sisäisellä kuvauksella tarkoitetaan ihmisten kuulojärjestelmän kaltaista vertausta, sillä se ottaa huomioon havaintotaajuuden ja äänenvoimakkuuden [16]. Tämä saavutetaan useissa vaiheissa: ajan kohdistuksessa, tason kohdistuksessa kalibroidulle kuuntelutasolle, aika-taajuus-kartoituksessa, taajuuden vääntymisessä sekä tiivistetyssä äänenvoimakkuuden skaalauksessa [16]. PESQ vertaa näitä kahta signaalia toisiinsa ja antaa niistä arvioidut MOS-pisteet.

### 3.2.2 POLQA-algoritmin kuvaus

POLQA (Perceptual Objective Listening Quality Analysis) on globaali standardi äänen laadun vertailuanalyysiin fiksattuihin, mobiili- ja IP-pohjaisiin verkkoihin [17]. POLQA-standardin kehittivät vuosina 2006–2011 alan johtavat asiantuntijat ITU-T Study Group 12:ssa, koska he tarvitsivat päivittää edeltäjänsä vuodelta 2001, PESQ:a [17]. Seuraavassa kuvassa (kuva 9) nähdään, kuinka äänenlaadun mittausalgoritmit ovat kehittyneet ja miten POLQA eroaa edeltäjästään PESQ:sta.

## Evolution of ITU-T Recommendations for Voice Quality Testing (P.86x - Full Reference MOS-LQO)



Kuva 9. POLQA:n kehitys verrattuna edeltäjiinsä [18]

POLQA tarjoaa edistyneen vertailutarkkuuden ja lisää merkittäviä uusia ominaisuuksia superlaajakaistaisiin äänisignaaleihin. Lisäksi se tarjoaa koodaus- ja VoIP-lähetysteknologiat. POLQA sopii hyvin arvioimaan, optimoimaan ja valvomaan verkkojen äänenlaatua ja toimittamaan standardoidun MOS-arvon. [14.]

Havaintomittausalgoritmi POLQA on OPTICOMin, Swiss-Qualin ja TNO:n yhteiskehitys, tekijänoikeuksilla ja patenteilla suojattu. POLQA on saatavilla OPTICOMin lisenssillä ohjelmistona eri alustoille. POLQA Coalition on kehittänyt POLQA:a edelleen ja ITU hyväksyi heidän kehittämänsä edition 3:n helmikuussa 2018. [14.]

### 3.2.3 BER-testauksen kuvaus

BER (Bit Error Rate) eli bittivirhesuhde on tietoliikennesignaalin eheyden mitta, joka perustuu virheellisesti vastaanotettujen bittien suhde lähetettyihin tai prosenttiosuuteen. Tämä ei varsinaisesti ole äänenlaadun mittaamisen menetelmä, mutta tällä voidaan tarkastella aaltomuodon yli

siirrettävien datapakettien eheyttä. Pohjimmiltaan, mitä enemmän vääriä bittejä, sitä suurempi vaikutus signaalin laatuun.

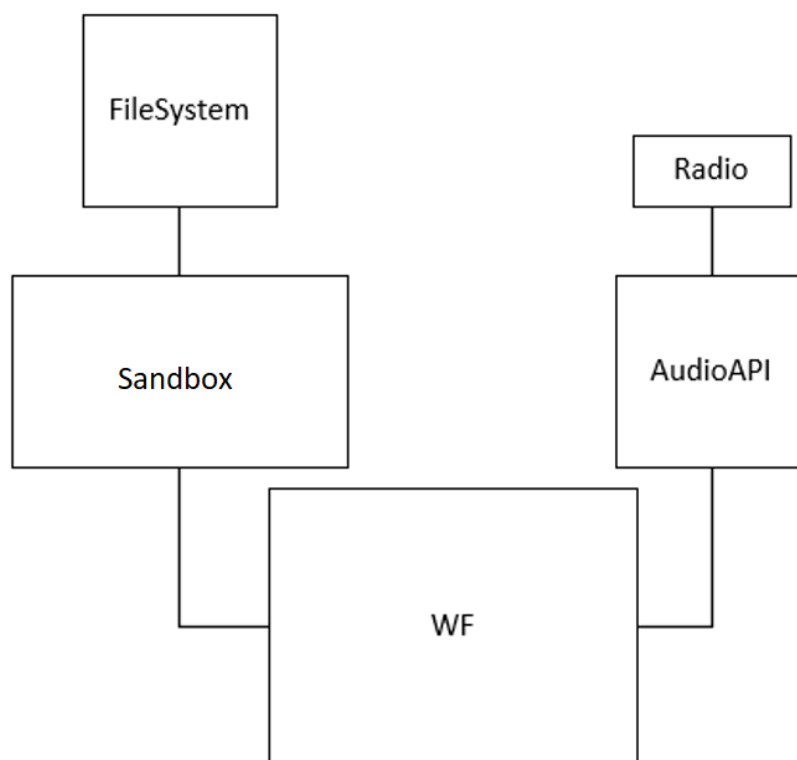
Kuten nimestä voi päätellä, bittivirhesuhde määritellään suhteellisuudesta (Rate), jolla virheitä esiintyy siirtojärjestelmässä. Tämä voidaan suoraan muuntaa virheiden lukumääräksi, jotka esiintyvät tietyn bittimäärän merkkijonossa. [15.]

Jos radiotie lähettimen ja vastaanottimen välillä on hyvä ja signaali-kohinasuhde korkea, bittivirhesuhde on hyvin pieni, eikä sillä ole havaittavaa vaikutusta koko järjestelmään. Jos kohinaa kuitenkin havaitaan, on mahdollista, että bittivirhesuhde on otettava huomioon. [15.]

## 4 Opinnäytetyön vaiheet

### 4.1 Suunnittelu

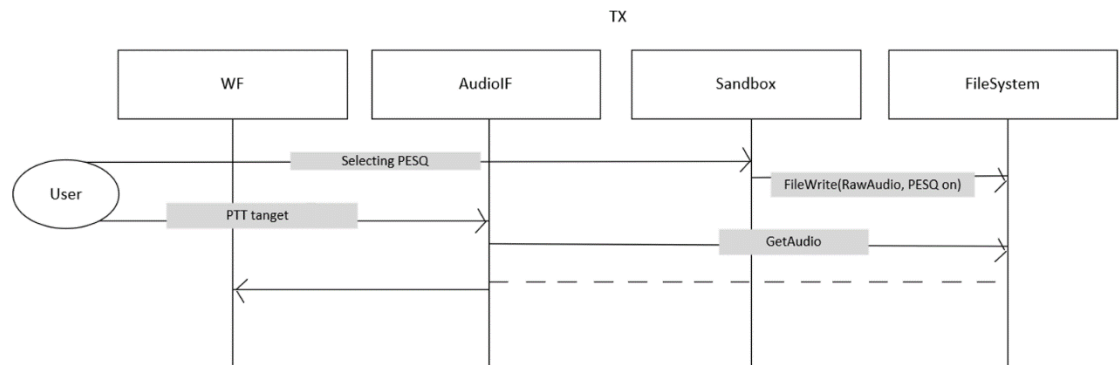
Ennen työn aloittamista oli paljon suunnittelua ja kuinka työ tulisi toteuttaa. Alkuun piirrettiin muun muassa arkkitehtuurikuvia selkeyttämään ideaa (Kuva 10). Tähän opinnäytetyöhön päätettiin, että PESQ:n käyttäminen äänenlaadun evaluointiin olisi paras vaihtoehto. Alla esitettävässä kuvassa on hieman kuvausta työn arkkitehtuurista.



Kuva 10. Pohja-arkkitehtuuri

Työ oli tarkoitus alun perin tehdä Tough SDR -radioon käyttämällä ja päivittämällä olemassa olevaa rajapintaa sandboxin ja aaltomuodon välillä. Muutosta ohjattiin tähän suuntaan, jotta toteutettua menetelmää voisi käyttää eri aaltomuodoilla ilman muutoksia aaltomuoto-ohjelmiston puolelle. Muutoksien vähäisyyttä toivottiin, koska se on ohjelmistoarkkitehtuurillisesti järkevää.

Yllättävistä ennalta-arvaamattomista tietoturvasyistä tätä suunnitelmaa jouduttiin muuttamaan yksinkertaisemmaksi. Suunniteltu rajapintatoteutus oli tarkoitus saada sandbox-sovellukseen ja se arkkitehtuurillisesti sijoittuu aaltomuodon (WF) ja Filesystemin väliin. Seuraavassa kuvassa (Kuva 11) näytetään tarkemmin toteutettavan TX-puolen toimintaa.



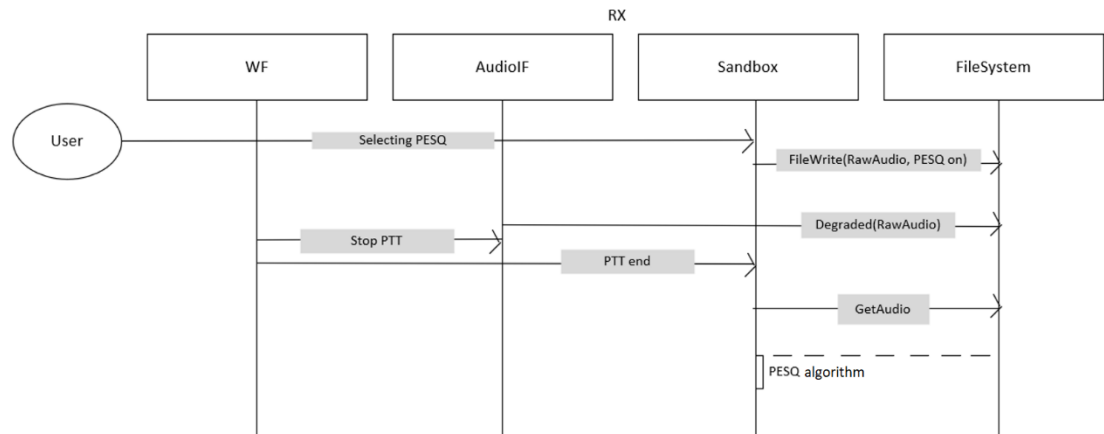
Kuva 11. TX suunnitelma

Kuvassa 11 on kuva TX eli lähettävän puolen toteutuksesta. Ensimmäiseksi käyttäjä valitsee sandboxilta PESQ:n käyttöön, minkä jälkeen sandbox antaa käskyn FileSystemille asettaa PESQ päälle ja määrittää siihen käytettävä äänitiedosto. Seuraavaksi käyttäjä pitää PTT-nappia pohjassa, jolloin audiorajapintaa käsketään hakemaan FileSystemiin tallennettu äänitiedosto ja lähettää se aaltomuodolle. Käyttäjä painaa PTT-nappia niin kauan kunnes äänitiedosto on lähetetty.

TX-puoleen toteutukseen tarvitsen SSH-yhteyden sandboxilta ja punaisen puolen ytimeen (core), mitä kautta PESQ:n voi ottaa käyttöön. Tarkoituksena on kopioida jo olemassa oleva äänitiedosto punaiseen ytimeen, jotta sitä voidaan käyttää äänenlaadun mittaamiseen, mutta tässä vaiheessa ilmeni hankaluuksia.

Hankaluuksia tuotti se, että sandboxilta tarvittiin yhteys punaiseen ytimeen SSH-yhteyden kautta. Tämä yhteys tarvitsee salasanan tiedoston siirtoon ja salasanan joutuisi kirjoittamaan erikseen käyttämällä komentoriviä. Sandboxin käyttäminen tässä tapauksessa ei tuntunut toimivalta vaihtoehdolta, koska komentorivin käyttäminen vaatii erillisen tietokoneen, joka on kiinni SDR-radiossa.

Vastaanottava puoli (RX) suunniteltiin kuvan 12 mukaiseksi, mutta ajan säästämiseksi PESQ-algoritmin sisältämä sovellus päätettiin tehdä suoraan eri ytimelle sandboxin ytimen sijaan. Toimintajajatus RX-puolella alkuun on vastaava TX-puoleen PESQ:n valitsemisesta.



Kuva 12. RX-suunnitelma

RX-puoli tallentaa toistetun äänen äänitiedostoksi FileSystemiin TX-puolen äänitiedoston lähetyksen jälkeen. Tämän jälkeen sandbox hakee molemmat äänitiedostot (alkuperäinen ja uusi tallennus) ja vertaa niitä toisiinsa PESQ-algoritmin avulla.

Nykyinen toiminta meneekin muutoin aivan samaan tapaan kuin suunnitelmassa, mutta sandboxia ei käytetä välissä ja sille tarkoitettu toiminta on sovellettu suoraan punaiseen ytimeen. Tämä muutos teki mahdolliseksi algoritmin käyttämisen ilman jatkuvaa salasanojen kirjoittelua. Tämän avulla äänenlaadun mittaaminen helpottui ja tuloksia saatiin nopeasti.

#### 4.2 SDR-laitteen käyttöönotto

SDR-laitteeksi tätä työtä varten valittiin Bittium Tough SDR Handheld. Laitteen käyttöönottoon löytyi omat ohjeensa Bittiumin yrityksen sisäisistä dokumentoinneista.

Saatuani SDR-laitteen käyttöni, oli alkuun päivitettävä laite uudemmilla ohjelmistopaketeilla (platform, waveform) ja varmistaa, että siinä on konfiguraatiot. Nämä päivitykset hoituivat kätevästi laitteelle suunnitellulla web-selaimella toimivan Nodemanager webUI:n kautta, lisäämällä paketit ohjelmistonpäivitysasetuksesta.

Seuraavaksi työn alla oli sandboxin, SDR-radiossa toimivan käyttöliittymän, kääntäminen. Vaikeuksia kääntämisessä tuotti se, että tähän opinnäytetyöhön soveltuvia sandboxin kääntöön vaadittavia ohjeita ei ollut löydettävissä, joten tässä joutui hakemaan paljon apuja. Hankaluudet johduivat loppujen lopuksi virheellisistä tietoturva-avaimista.

#### 4.3 PESQ:n käyttäminen

PESQ algorimin sisältämä sovellus käännettiin suoraan punaiselle aaltomuodolle kuuluvalla ytimelle sandbox ytimen sijaan, jonne se oli tarkoitus alkuperäisen suunnitelman mukaan tuoda. Punainen puoli osoittautui paremmaksi valinnaksi sandboxin sijaan äänenlaadun mittaamisessa, koska sandboxin kautta mittaamisessa ilmeni ongelmia. Syynä tähän ongelmaan oli puna-/musta arkkitehtuuri ja SDR-laitteen tietoturvasäännöt.

Ennen äänenlaadun mittaamista ohjelmistoradiot käynnistetään ja odotetaan aaltomuodonkin käynnistyvän ja muodostavan radioverkon toisen ohjelmistoradion kanssa. Seuraavaksi valitaan molempiin ohjelmistoradioihin PTT:n käyttöön soveltuvat konfiguraatiot, jonka jälkeen asetetaan PESQ päälle mittaamisoperaatiota varten. Tämän jälkeen painetaan PTT-nappia, mikä aloittaa äänitiedoston toistamisen radioyhteyden yli vastaanottavassa ohjelmistoradiossa. Vastaanottava puoli tallentaa äänen äänitiedostoksi, jonka jälkeen algoritmin avulla alkuperäistä äänitiedostoa verrataan tallennettuun äänitiedostoon ja siitä muodostuu PESQ:n antama MOS-arvo.

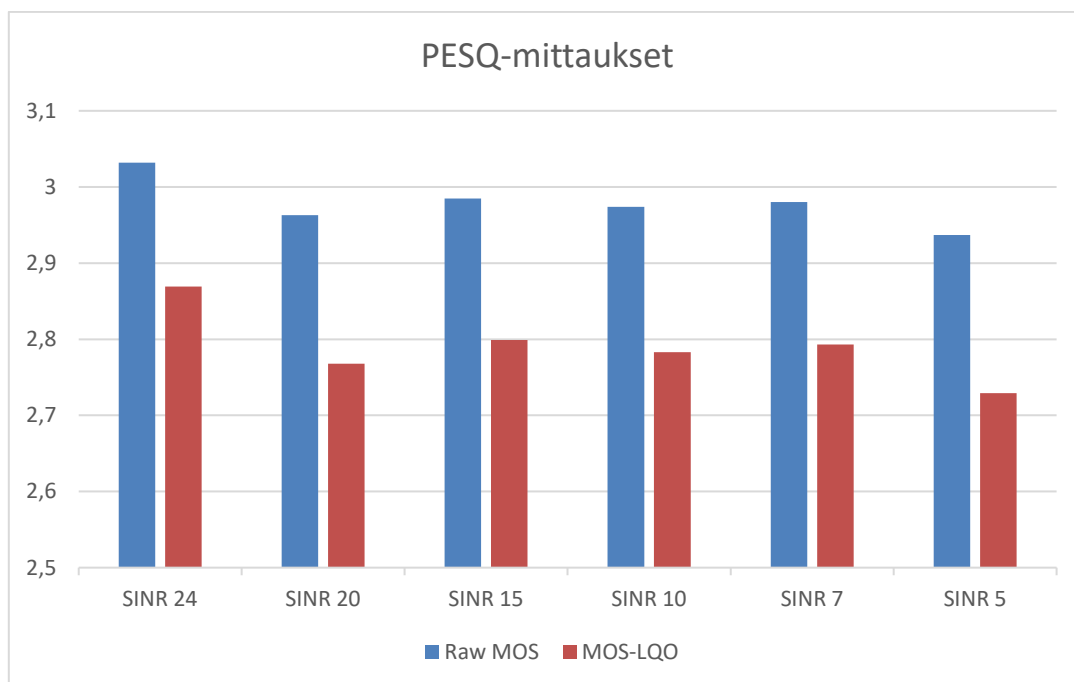
Varsinaiseen PESQ:n käyttöön tarvitsee lisenssit. PESQ-algoritmin koodit sai ladattua netistä tietyn ehdoin, kun esimerkiksi testaa PESQ:n toimintaa ja tutkii sen rakennetta. Tulevaan sandbox-sovellukseen sitä ei varsinaisesti tule, vaan se on puhtaasti opinnäytetyötä varten.

#### 4.4 Saatujen tulosten arviointi

Ensimmäisillä mittauskerroilla MOS-arvot pyörivät arvojen 1–2 välillä, mikä pistemääränä vaikuttaisi ilmaisevan äänenlaadun olevan erittäin huono. Tallennettua äänitiedostoa kuunnellessa huomasi äänen tulevan hieman keskeneräisenä, sillä lähetetyn äänen alkuosa oli jäänyt kokonaan pois. Aaltomuoto, jota testissä käytettiin, vaatii äänen MOS-arvon olevan vähintään 2.6, kun siirtotiedolla ei ole virheitä. Tämän huomioiden tulokset eivät vaikuttaneet oikeilta. Tutkiessa virheen alkuperää, päätettiin asentaa laitteelle uusi käänös PESQ-algoritmista virheiden löytämiseksi, minkä jälkeen MOS-tulokset alkoivat ilmenemään realistisempina.

Virheellisten mittauksien jälkeen saadut tulokset, joita saatiin PESQ:a käyttämällä, olivat tasoa 3, mikä tarkoittaa sitä, että äänenlaatu oli selvää. Testi oli yksinkertainen tehdä ja sillä sai nopeasti tarkkoja tuloksia. Tuloksia vertailtiin erilaisilla vaimennuksilla ohjelmistoradioiden välillä. Vaimennukset ovat radioiden väliin asetettavia signaalia heikentäviä vastuksia, joiden on tarkoitus

simuloida signaalin heikentymistä maastossa. Näillä yritettiin saada aikaan mahdollisimman heikkoja tuloksia vertailuksi äänenlaadun mittaamiseen, minkä näkee kuvasta 13.



Kuva 13. PESQ-mittauksien tulokset

Kuvassa 13 olevat SINR-arvot (Signal to Interference & Noise Ratio) kertovat ohjelmistoradioiden välisestä yhteyden laadusta. Mitä matalammat SINR-arvot ovat, sitä huonompi yhteys. Kuvasta huomataan, kun SINR-arvot lähestyvät pienempiä lukemia, silloin MOS-arvotkin hieman laskevat. SINR-arvojen säätäminen onnistui kasvattamalla ohjelmistoradioiden välistä vaimennusta, mikä vahvempaan vastaa kentällä testatessa muun muassa kantovälimatkan pitenemistä.



## 5 Arviointi ja pohdinta

Äänenlaadun mittaamisen tiedonetsintään ja toiminnan ymmärtämiseen meni huomattavan paljon aikaa, kun vertaa alkuolettamaan työn laajuudesta ja käytettävissä olevasta ajasta. Työn kokonaisuutta joutui yksinkertaistamaan eteen tulleiden yllättävien haasteiden vuoksi. Jos aikaa olisi ollut enemmän, olisin saanut varmasti työtä edistettyä haluttuun alkuperäistä suunnitelmaa vastaavaan tulokseen.

Työn tekoon liittyvät osat olivat jälkeinpäin ajateltuna erittäin yksinkertaisia, mutta niitä ei heti työn alkuun täysin ymmärtänyt. Lisäksi Linux-työympäristö oli minulle hieman uusi, niin se teki työn edistämisestä hieman hitaampaa. Työtä hidastivat myös ympäristön kompleksisuus ja laitteen kova tietoturva, joiden takia suunnitelmaa joutui työn edetessä vähän muuttamaan.

Työ myös käsitti semmoisia elementtejä, joista en oman alani koulutuksissa ole tarkkaan oppinut, sillä minulle koulussa tutummaksi tuli ohjelmointi, eikä niinkään älykkäät järjestelmät. Jos opin-  
toni olisivat pohjautuneet älykkäiden järjestelmiin, niin uskoisin, että tekniset taustat olisivat jo suhteellisen paljon tutumpia ja niistä saisi kattavammin tekstiä aikaan. Lisäksi älykkäiden järjestelmien opinnoista olisi ollut hyötyä varmasti työn toteuttamisessakin olen kuitenkin tyytyväinen siihen, mitä sain aikaan ottaen huomioon suuntautumiseni.

## 6 Yhteenveto

### 6.1 Johtopäätökset

Keskeiset tulokset, mitä äänenlaadun mittaamisesta saatiin, vastasivat ennalta odotettuja arvoja, mitkä olivat hyviä. Tästä voidaan päätellä, että työ onnistui hyvin ja tästä on hyvä jatkaa eteenpäin jatkokehittämällä tätä työtä. Saatujen tuloksien avulla nähdään äänenlaadun taso ja vastaa- vasti, jos arvot olisivat huonoja niin saadaan aikaan kysymys, onko signaali ohjelmistoradioiden välillä huono vai onko äänen lähettämisessä jokin muu vika, mikä aiheuttaisi huonon laadun.

Tähän opinnäytetyöhön liittyviin tavoitteisiin päästiin: äänenlaadun mittaamisen erilaisia mene- telmiä on tutkittu ja äänenlaadun mittaaminen onnistui. Tulosteiden kannalta äänenlaatu säilyy hyvänä ja siitä saa selvää myös hieman huonomminkin kuuluvuusarvoilla. Silloin kun kuuluvuus- arvot ylitetään, arvojen oletetaan tippuvan mataliksi ja niin kävikin.

Tämän opinnäytetyön aikana olen oppinut paljon erilaisista äänenlaadun mittaamisen menetel- mistä, vaikka minulla aika alkoikin käydä työn tekemiseen lyhyeksi. Kun ottaa huomioon sen, mil- laiset tiedot minulla oli aiheestani ennen opinnäytetyön tekoa, ne ovat työn aikana karttuneet hyvinkin kattaviksi. Tämän työn aikana minulle tulivat myös entistä tutummaksi Linux-käyttöjär- jestelmä ja siihen liittyvät komennot, sillä Linuxista ei paljon aikaisempaa kovin syvällistä koke- musta ole ollut. Lisäksi opin työn aikana aaltomuodoista ja SDR-radioista sekä siitä, kuinka ääni oikein kulkeekaan ohjelmistoradiossa.

Työtä tehdessä huomasin, että alussa tarkka suunnittelu ja asioiden tutkiminen olisi ollut erittäin tärkeää ja erilaisten menetelmien tutkiminen olisi voinut tapahtua siinä sivussa. Työtä olisi voinut saada hyvää tahtia eteenpäin jo heti alkuvaiheissa kaiken tiedonhaun sijaan. Ajan puutteellisuuden vuoksi työtä joutui jo hieman kiirehtimään, jotta tavoitteisiin päästiin.

### 6.2 Jatkokehitysideat

Työtä voisi kehittää alkuperäisen suunnitelman mukaiseksi, saamalla toimivan rajapinnan suo- raan sandboxin kautta. Tämänhetkinen toteutus nimittäin vaatii komentoriville käskyjen antami- sen algoritmin käyttämiseen, mikä tarkoittaa tietokoneen välttämätöntä käyttämistä. Jatkossa toivoisimme, että äänenlaatua pääsee mittaamaan ilman tietokonetta välikätenä. Äänenlaadun

mittaaminen olisi siis hyvä, jos sitä pääsisi suoraan ohjelmistoradiosta valitsemalla mittaamaan. Tämä rajapintatoteutus myös mahdollistaisi erilaisilla aaltomuodoilla onnistuvan äänenlaadun mittaamisen ilman, että jokaiselle aaltomuodolle tarvitsisi tehdä omaa toteutusta.

Jatkokehitykseksi tähän työhön olisi saatava oma algoritmi, jolla voi jatkossa mitata äänenlaatua PESQ:n käyttöön vaadittavien lisenssien takia. Opinnäytetyöhön PESQ:n käyttäminen oli vielä suotavaa, sillä tarkastelin sen toimintaa ja kokeilin, saadaanko sen kautta tuloksia aikaan. Tämä voisi olla mahdollista toteuttaa hyvällä suunnittelulla ja syvällisemmällä tutkimuksella äänenlaadun mittaamisen algoritmeihin.

Lisäksi jatkossa äänenlaadun mittaamisen voisi automatisoida uusien muutosten tullessa, jolloin testaaminen olisi entistä helpompaa. Automaattinen äänenlaadun mittauksien muutosten seuraaminen olisi hyvä tapa saada nopeat arviot äänenlaadusta ja kuinka muutokset mahdollisesti muuttivat näitä arvoja.

## Lähteet

### Lähdeluettelo:

- 1 Hostinger, SSH, [Internet] Saatavilla: <https://www.hostinger.com/tutorials/ssh-tutorial-how-does-ssh-work> Haettu 16.5.2022
- 2 TechTarget, VoIP (voice over Internet Protocol), [Internet] Saatavilla: [https://www.techtarget.com/searchunifiedcommunications/definition/VoIP#:~:text=VoIP%20\(voice%20over%20Internet%20Protocol\)%20is%20the%20transmission%20of%20voice,phones%20and%20WebRTC%20enabled%20browsers](https://www.techtarget.com/searchunifiedcommunications/definition/VoIP#:~:text=VoIP%20(voice%20over%20Internet%20Protocol)%20is%20the%20transmission%20of%20voice,phones%20and%20WebRTC%20enabled%20browsers). Haettu 13.5.2022
- 3 Bittiumin yleiskuvaus. [Internet] Saatavilla: <https://www.bittium.com/about-bittium/facts-figures/company-overview> Haettu 28.4.2022
- 4 Wireless Excellence Limited, Software Defined Radio, SDR, [Internet] 2020. Saatavilla: <https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/software-defined-radio-sdr/> Haettu 14.5.2022
- 5 Bittium Tough SRD Handheld tuotekuvaus. [Internet] Saatavilla: <https://www.bittium.com/tactical-communications/bittium-tough-sdr-handheld> Haettu 27.4.2022
- 6 Bittium Tough SDR brochure, [Internet] 2021 Saatavilla: <https://www.bittium.com/tactical-communications/bittium-tough-sdr-handheld> Haettu: 15.5.2022
- 7 John A. Davidson, On the architecture of secure software defined radios, [Internet] 2009 Saatavilla: [https://omidi.iut.ac.ir/SDR/2009/88\\_Ali%20Shamsizadeh\\_SDR\\_Security%20in%20SDR%20and%20CR/references/%5B2%5D.pdf](https://omidi.iut.ac.ir/SDR/2009/88_Ali%20Shamsizadeh_SDR_Security%20in%20SDR%20and%20CR/references/%5B2%5D.pdf) Haettu: 17.5.2022
- 8 Thomas Sundquist, Waveform Development using Software Defined Radio, 2006. [Internet] Saatavilla: [http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:21831/FULLTEXT01.pdf&sa=U&ei=3v5oU8WPF82Gy-ASd2IJA&ved=0CCEQFjAB&usg=AFQjCNErcXBbYh\\_RdNZfUaZO6Fbu3asjhg](http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:21831/FULLTEXT01.pdf&sa=U&ei=3v5oU8WPF82Gy-ASd2IJA&ved=0CCEQFjAB&usg=AFQjCNErcXBbYh_RdNZfUaZO6Fbu3asjhg) Haettu 16.5.2022

- 9 ResearchGate, Kuva aaltomuodosta [Internet] 2022 Saatavilla: [https://www.researchgate.net/figure/Digital-Modulation-techniques-A-to-D\\_fig2\\_316471712](https://www.researchgate.net/figure/Digital-Modulation-techniques-A-to-D_fig2_316471712) Haettu 18.5.2022
- 10 David Morelo, Linux Hint LLC, ALSA [Internet] 2022. Saatavilla: <https://linux-hint.com/guide/linux/audio/> Haettu 14.5.2022
- 11 Roland Corporation, Vocoder, [Internet] 2022. Saatavilla: <https://www.roland.com/uk/blog/what-is-a-vocoder/?lang=en-GB> Haettu 14.5.2022
- 12 ITU, ITU-T in brief [Internet] 2022. Saatavilla: <https://www.itu.int/en/ITU-T/about/Pages/default.aspx> Haettu 22.5.2022
- 13 Josh O'Farrell, What is PESQ. [Internet] 2022. Saatavilla: <https://www.spearline.com/blog/what-is-pesq/> Haettu 10.3.2022
- 14 OPTICOM, PESQ esimerkkikuvat [Internet] 2022. Saatavilla: <https://www.opticom.de/technology/pesq.php> Haettu 13.4.2022
- 15 PAL Acoustics, PESQ ja MOS kuvat [Internet] 2007. Saatavilla: <http://www.pal-acoustics.com/index.php?a=services&id=143&lang=en> Haettu 20.4.2022
- 16 ITU, P.862: Revised Annex A - Reference implementations and conformance testing for ITU-T Recs P.862, P.862.1 and P.862.2 [Internet] 2017. Saatavilla: <https://www.itu.int/rec/T-REC-P.862> Haettu 20.4.2022
- 17 OPTICOM, SwissQual and TNO, POLQA [Internet] 2022. Saatavilla: <http://www.polqa.info/> Haettu 6.3.2022
- 18 OPTICOM, Kuva POLQA:sta [Internet] 2022. Saatavilla: <https://www.opticom.de/technology/polqa.php> Haettu 13.3.2022
- 19 Electronic Notes, What is Bit Error Rate: BER tutorial, [Internet] 2022. Saatavilla: <https://www.electronics-notes.com/articles/radio/bit-error-rate-ber/what-is-ber-definition-tutorial.php> Haettu 16.5.2022