

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Tietotekniikan osasto

Mervi Karru

Signaalianalyysin kehittäminen äänen etenemistutkimukseen

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoo, 30.11.2004

Valvoja	Professori Matti Karjalainen
	Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio
Ohjaaja	DI Panu Maijala

Tekijä:	Mervi Karru	
Työn nimi:	Signaalianalyysin kehittäminen äänen etenemistutkimukseen	
Päivämäärä:	30.11.2004	Sivuja: 74
Osasto:	Tietotekniikka	
Professuuri:	S-89	
Työn valvoja:	Prof. Matti Karjalainen	
Työn ohjaaja:	DI Panu Maijala	
Työn tavoitteena oli kehittää signaalianalyysiohjelmisto äänen etenemistutkimukseen. Tutkimuksessa selvitetään sääolosuhteiden vaikutusta äänen etenemiseen. Työssä kerrotaan yleistietoa äänen etenemisestä ilmakehässä. Työssä kuvataan myös tutkimuksessa käytettävä mittausjärjestelmä, jolla äänen etenemistä mitataan runsaan kolmen kilometrin välimatkalla automaattisesti tunnin välein. Pääpaino on signaalianalyysin kehittämisessä. Valmis analyysiohjelmisto sisältää neljä erilaista analyysiä. Taustakohina-analyysillä saadaan mittauksista selville taustakohinan äänipainetaso ajan ja taajuuden funktiona. Tasot lasketaan terssikaistoittain. Etenemisvaimennusanalyysissä äänen etenemismittauksista selvitetään mittaussignaalin taso vastaanottopisteessä terssikaistoittain. Myös signaalin aikaista taustakohinatasoa seurataan. Taustakohinatason seuranta tapahtuu poistamalla mitatusta signaalista herätteen taajuudet kais-tanestosuotimella. Herätteenä etenemisvaimennuksen mittauksissa on käytetty sinisignaalia eri terssikaistoilla. Taustakohinan ja signaalin tasot lasketaan sekä koko signaalin pituudelta, että puolen sekunnin pituisissa aikaikkunoissa. Saatuja arvoja voidaan verrata toisiinsa. Etenemisviiveanalyysissä käytetään herätteenä sinipyyhkäisyjä. Analyysi perustuu ristikorrelaation käyttöön. Myös suunta-analyysi perustuu ristikorrelaation käyttöön herätteen ja mikrofoniantennin eri mikrofonioiden välillä. Analyytituloksiin liittyy parametreja, jotka kertovat tulosten luotettavuudesta. Yksi parametreista on signaali-kohinasuhde. Etenemisvaimennusanalyysissä kerrotaan lisäksi aikaikkunoissa laskettujen tasojen hajonta ja viiveanalyysissä eri pyyhkäisyistä laskettujen tulosten eli viiveiden hajonta. Signaalianalyysi on toteutettu Matlab-ohjelmistona. Avainsanat: Signaalianalyysi, äänen eteneminen		

Author:	Mervi Karru		
Name of the thesis:	Development of Signal Analysis for the Sound Propagation Measurement		
Date:	Nov 30, 2004	Number of pages:	74
Department:	Computer Science and Engineering		
Professorship:	S-89		
Supervisor:	Professor Matti Karjalainen		
Instructor:	Panu Maijala, M.Sc.		
The goal of this work was to develop signal analysis software for a sound propagation re- search. The purpose of the research is to study the effects of meteorological conditions on sound propagation. The distance between sound source and receiver is about three kilometers, and measurements are performed automatically once in an hour. In the work there is general information on sound propagation in the atmosphere. The mea- surement system is also described. The emphasis is on the signal analysis. There are four analyses implemented in the signal analysis system. One of them is the back- ground noise analysis. Noise level is measured in time windows and for third-octave frequency bands. For attenuation of sound propagation, the signal level in the receiver end is analysed. The level is calculated for each third-octave band. The transmitted signal consists of sinusoidal signals in different third-octave bands. Background noise level during the signal is analysed by filtering the transmitted sinusoidal signals out of the measured signal. Sine sweeps and cross-correlation are used in the time delay analysis and in the direction of arrival analysis. There are also parameters that describe the reliability of the results. One of the parameters is signal to noise ratio. Standard deviation of the levels is reported in the level analysis. In the delay analysis the standard deviation of the delays measured from different sine sweeps is given. The signal analysis system has been implemented in Matlab. Analyses can be run as batch jobs. Keywords: signal analysis, sound propagation			

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty Teknillisen korkeakoulun Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratoriossa. Työ tehtiin yhteistyössä Tampereen VTT:n kanssa.

Haluan esittää suuret kiitokseni valvojalleni professori Matti Karjalaiselle ideoista, rakentavista korjaus- ja parannusehdotuksista sekä tieteelliseen työskentelyyn liittyvien vaatimusten selvittämisestä. Kiitos myös ohjaajalleni Panu Maijalalle Tampereen VTT:ltä mahdollisuudesta työskennellä kiinnostavan aiheen parissa ja tutustuttamisesta mielenkiintoiseen tutkimusjärjestelmään.

Kiitokset kuuluvat myös Puolustusvoimien Teknillisen Tutkimuslaitoksen Jari Hartikaiselle ja Ossi Ojaselle hyödyllisistä kommentista ja työn oikoluvusta.

Lisäksi haluan kiittää vanhempiani koko opiskelujen aikaisesta kannustuksesta, sekä esittää rakkaimmat kiitokset kihlatulleni Erkalle, jonka tuki oli korvaamatonta niin diplomityön, kuin opiskelujenkin aikana.

Otaniemessä, 30.11.2004

Mervi Karru

Sisältö

Lyhenteet	vii
Matemaattiset symbolit	viii
Kuvat	ix
Taulukot	xi
1 Johdanto	1
2 Äänen etenemisen fysiikkaa	3
2.1 Äänen vaimeneminen geometrisen leviämisen vuoksi	3
2.2 Ilmakehän ja sääolojen vaikutukset äänen etenemiseen	5
2.2.1 Tuuli	5
2.2.2 Turbulenssi	5
2.2.3 Suhteellinen kosteus	6
2.2.4 Lämpötila	6
2.2.5 Sääoloihin liittyvistä etenemisvaimennustutkimuksista	7
2.3 Maanpinnan ja ympäristön vaikutukset äänen vaimenemiseen	8
3 Mittausjärjestelmän kuvaus	9
3.1 Laitteet ja mittausympäristö	9
3.1.1 Kaiuttimet ja mikrofonit	9
3.1.2 Maasto	12

3.1.3	Palvelimet	12
3.2	Mittautapahtuman kulku	13
3.2.1	Äänen etenemismittaukset	13
3.2.2	Taustakohinamittaukset	15
3.3	Aikasynkronian hallinta	15
3.4	Säähavainnot	16
3.5	Mittausjärjestelmän tukitehtävät	17
4	Signaalianalyysi	18
4.1	Yleistä analyysiohjelmistosta	18
4.1.1	Analyysin toimivuuden ja tarkoituksenmukaisuuden testaus	19
4.2	Taustakohina-analyysi	20
4.2.1	Tasojen laskeminen	20
4.2.2	Suodatus	21
4.2.3	Ikkunointi	23
4.2.4	Testiajot	24
4.2.5	Matlab-koodin testaus	24
4.3	Etenemisvaimennusanalyysi	25
4.3.1	Signaali-kohinasuhde ja häiriöiden vaikutukset	28
4.3.2	Kaistanleveys	30
4.3.3	Tasolaskenta vaihe vaiheelta	31
4.3.4	Testiajot	32
4.3.5	Matlab-koodin testaus	33
4.4	Etenemisviiveanalyysi	35
4.4.1	Tason nousuhetki	37
4.4.2	Hilbert-verhokäyrä ja sigmoid-funktio	38
4.4.3	Sinipyyhkäisyjen ristikorrelaatio	40
4.5	Suunta-analyysi	48
4.5.1	Ristikorrelaatio suoraan eri mikrofoniin välisistä vasteista	48

4.5.2	Ristikorrelaatioiden ristikorrelaatio	48
5	Yhteenveto ja loppupäätelmät	51
5.1	Taustakohina- ja etenemisvaimennusanalyysit	51
5.2	Etenemisviiveanalyysi	52
5.3	Suunta-analyysi	52
	Kirjallisuutta	55
A	Matlab-funktiot	56
B	Sekvenssikaaviot	58
B.1	Taustakohina-analyysi	59
B.2	Etenemisvaimennusanalyysi	60
B.3	Etenemisviiveanalyysi	61
B.4	Suunta-analyysi	62

Lyhenteet

AMDF	Averaged Magnitude Difference Function
ARMA	Autoregressive Moving Average
FFT	Fast Fourier Transform
NTP	Network Time Protocol
RMS	Root - Mean - Square
TDE	Time Delay Estimation

Matemaattiset symbolit

a	Vasteen kokonaistehon ja kohinan välinen suhde
A	Vaimennus
b	Kaistanleveys
c	Äänen nopeus
d_1	Vaimentuneen äänen mittauspisteen etäisyys lähetyspisteestä
d_2	Alkuperäinen etäisyys lähetyspisteestä
f	Taajuus
G	Vaimentumisvakio
l	Aikaikkunan pituus
L_{pr}	Vastaanottopisteen äänitaso
L_{ps}	Lähetyspisteen äänitaso
n	Ikkunoitavan osan pituus
N	Aikajakson pituus näytteinä
r_{xy}	Ristikorrelaatio
p	Ääniteho
$p(r)$	Vastaanottopisteen ääniteho
$p(s)$	Lähetyspisteen ääniteho
p_n	Kohinan teho vasteessa
p_s	Mittaussignaalin teho vasteessa
p_x	Vasteen kokonaisteho
t	Aika
T	Lämpötila Celsiusasteina
w	Ikkunafunktio

Kuvat

2.1	Signaalin geometrinen leviäminen.	4
2.2	Äänen vaimentuminen ilman suhteellisen kosteuden funktiona.	6
2.3	Äänen kaartuminen ilmakehässä riippuu lämpötilaprofilista.	7
3.1	Mittausjärjestelmän laitekaavio	10
3.2	Kaiuttimet	10
3.3	Mikrofonit sijaitsevat suolla.	11
3.4	Mikrofonien asettelu	11
3.5	Kartta kaiutinten ja mikrofonien välisestä maastosta.	12
3.6	Herätesignaalin spektrogrammi.	14
4.1	Aineistosta tuloksiin.	19
4.2	Suodatettava signaali aikatasossa.	21
4.3	Signaalin Fourier-muunnoksen itseisarvo	22
4.4	Fourier-muunnoksesta on poistettu muut taajuudet paitsi haluttu taajuuskaista.	22
4.5	Käänteis-Fourier-muunnettu suodatettu signaali aikatasossa.	22
4.6	Tasolaskennassa käytettävä painotusikkuna.	23
4.7	Ikkunointi tasolaskennassa	24
4.8	Taustakohina-analyysi, häiriötön tapaus.	25
4.9	Taustakohinan tasojakauma 1.-7.6.2004, 80 Hz	26
4.10	Taustakohinan tasojakauma 1.-7.6.2004, 1000 Hz	26
4.11	Taustakohinan tasojakauma 25.-31.10.2004, 80 Hz	27

4.12	Taustakohinan tasojakauma 25.-31.10.2004, 1000 Hz	27
4.13	Äänipainetason muuttumiseen vaikuttavat tekijät.	28
4.14	Sinitaajuuksien leviäminen.	31
4.15	Sinisignaalin tasovaihtelu.	34
4.16	Signaalitasot 80 Hz kaistalla.	34
4.17	Taustakohinatasot 80 Hz kaistalla.	35
4.18	Signaalitasot 1000 Hz kaistalla.	35
4.19	Taustakohinatasot 1000 Hz kaistalla.	36
4.20	Signaalin saapumishetken selvittäminen tehokeskiarvoista.	38
4.21	Hilbert-käyrä ja sigmoid-funktio herätteelle.	39
4.22	Hilbert-käyrä kahdelle esimerkkivasteelle.	40
4.23	Viiveanalyysin ristikorrelaation itseisarvo.	42
4.24	Hilbert-verhokäyrä ja huipun etsiminen viiveanalyysissä.	43
4.25	Sinipyhyhkäisyyden ristikorrelaatio vasteen ja herätteen välillä.	44
4.26	Esimerkki etenemisviiveanalyysistä yhden vuorokauden aikana.	45
4.27	Etenemisviiveanalyysin testiajo, viiveet.	46
4.28	Etenemisviiveanalyysin testiajo, signaali-kohinasuhteet.	46
4.29	Etenemisviiveanalyysin testiajo, hajonnat.	47
4.30	Suunta-analyysin ensimmäinen versio.	49
4.31	Suunta-analyysin ensimmäinen vaihe.	49
4.32	Suunta-analyysin toinen vaihe.	50
4.33	Suunta-analyysin kolmas vaihe.	50
4.34	Suunta-analyysin neljäs vaihe.	50

Taulukot

3.1	Herätesignaalin sinitaajuudet hertseinä	14
4.1	Taustakohinatason seuraamisessa käytettävän suotimen vaimennusvaikutus terssikaistoittain.	33

Luku 1

Johdanto

Tämä työ on tehty osana tutkimusta, jossa selvitetään sääolosuhteiden ja maaston vaikutusta äänen etenemiseen. Työssä kuvataan tutkimuksessa käytettävä mittausjärjestelmä ja kehitetään automaattinen signaalianalyysiohjelmisto tutkimuksessa saadulle mittausaineistolle. Analyysiohjelmiston tehtävänä on selvittää tutkimuksessa tehdyistä mittauksista taustakohinan taso, äänen etenemisviive, äänen etenemisvaimennus ja saapumiskulma. Tavoitteena on saada nämä asiat selville aineistosta luotettavasti.

Äänen etenemistutkimuksessa selvitetään ilmiöitä, jotka aiheuttavat merkittäviä poikkeamia äänen etenemiseen. Tutkimuksessa tehdään mittauksia ympäri vuoden noin kahden vuoden ajan aina tunnin välein. Tällä tavoin saadaan kattava mittausaineisto, jonka perusteella voidaan mallintaa sääolosuhteiden vaikutusta äänen etenemiseen. Haasteen tutkimukseen tuo äänilähteen ja vastaanottopisteen välinen välimatka, joka on yli kolme kilometriä.

Mittausten lisäksi tietoa kerätään sääoloista ja taustakohinatason vaihteluista. Suurin osa meteorologisista laitteista sijaitsee Ilmatieteen laitoksen Sodankylän tutkimusasemalla, mitausten vastaanottopisteen läheisyydessä.

Työssä kehitettävässä signaalianalyysissä käytetään tavallisia signaalinkäsittelyn menetelmiä, kuten aika-taajuus-esitystä, FFT¹-suodatusta ja ristikorrelaatiota. Lisäksi analyysissä annetaan luotettavuusarvioita esimerkiksi signaali-kohinasuhteen avulla. Analyysejä voidaan ajaa eräajona tai yksittäinen tapaus kerrallaan. Tulokset talletetaan tekstitiedostoihin, joista niitä voidaan lukea myöhemmässä tutkimuksen vaiheessa.

Työn luvussa 2 käydään läpi tutkimukseen liittyvää taustatietoa ja kerrotaan perustietoa äänen etenemisestä ilmakehässä. Lisäksi käydään läpi yleisimmät sääolojen aiheuttamat vaikutukset äänen etenemiseen.

¹Fast Fourier Transform

Luvussa 3 kuvataan käytettävä mittausjärjestelmä. Luvussa kerrotaan käytettävistä laitteista, mittausympäristöstä, herätesignaalista ja mittaustapahtuman kulusta. Samoin kerrotaan myös palvelinten välisen aikasyntronian saavuttamisesta ja kerättävistä säähavainnoista.

Luvussa 4 keskitytään itse signaalianalyysiin. Siinä kuvataan analyysi kerrallaan, miten mittauksista selvitetään toivotut asiat. Samalla pohditaan myös muita ratkaisumahdollisuuksia ja arvioidaan, miten menetelmiä voisi edelleen parantaa.

Luvussa 5 kerrotaan päätelmät analyysien tuloksista ja arvioidaan tutkimuksen tulevaisuudennäkymiä.

Luku 2

Äänen etenemisen fysiikkaa

Ääni etenee ilmassa aaltoliikkeenä. Ilman värähtelyn aiheuttaa äänen syntypäässä äänilähde, joka saa ilman värähtelemään. Ilmassa olevat molekyylit puolestaan saavat ympärillään olevat molekyylit värähtelemään. Lopulta ääni saapuu vastaanottopäähän. Vastaanottopäässä äänen voimakkuus voidaan mitata esimerkiksi mikrofonilla, jonka kalvo värähtelee äänen vaikutuksesta. Kalvon värähtely mitataan, ja näin saadaan selville äänipainetaso.

Äänen etenemisen fysiikkaa on tutkittu jo 1700-luvulta lähtien. Aluksi haluttiin vastauksia mm. kysymyksiin "kuinka kauas ääni liikkuu sekunnissa", "vaikuttavatko vuodenajat äänen etenemiseen" tai "vaikuttaako sää äänen nopeuteen" [15]. Nykyään ollaan hyvin kiinnostuneita erityisesti ympäristömelusta ja melun leviämisestä. Esimerkiksi eräässä japanilaisten tekemässä tutkimuksessa selvitettiin, miten tekosaarelle rannikon edustalle suunniteltu lentokenttä aiheuttaisi melua rannikolle eri sääolosuhteissa [5], [8].

Äänen etenemiseen liittyy äänen vaimenemista, leviämistä, väritymistä ja suunnan muutoksia.

2.1 Äänen vaimeneminen geometrisen leviämisen vuoksi

Äänen vaimeneminen tarkoittaa tässä yhteydessä vastaanottopisteen ja lähetyspisteen äänipainetasojen erotusta. Vaimenemista voidaan kuvata yhtälöllä (2.1) [1]. Yhtälössä A tarkoittaa vaimenemista, L_{ps} lähetyspisteen lähellä mitattua äänipainetasoa (esim. 1 m päässä äänilähteestä) ja L_{pr} äänipainetasoa etäämpänä äänilähteestä (esim. 10 m päässä lähteestä). Symboli $p(s)$ on vastaavasti äänipaine lähetyspisteen lähellä ja $p(r)$ äänipaine etäämpänä äänilähteestä.

$$A = L_{ps} - L_{pr} = 20 \log \frac{p(s)}{p(r)} \quad (2.1)$$

Äänen vaimenemisen yksi merkittävä syy on äänienergian leviäminen yhä suuremmalle alueelle äänen edetessä. Tätä kutsutaan geometriseksi leviämiseksi.

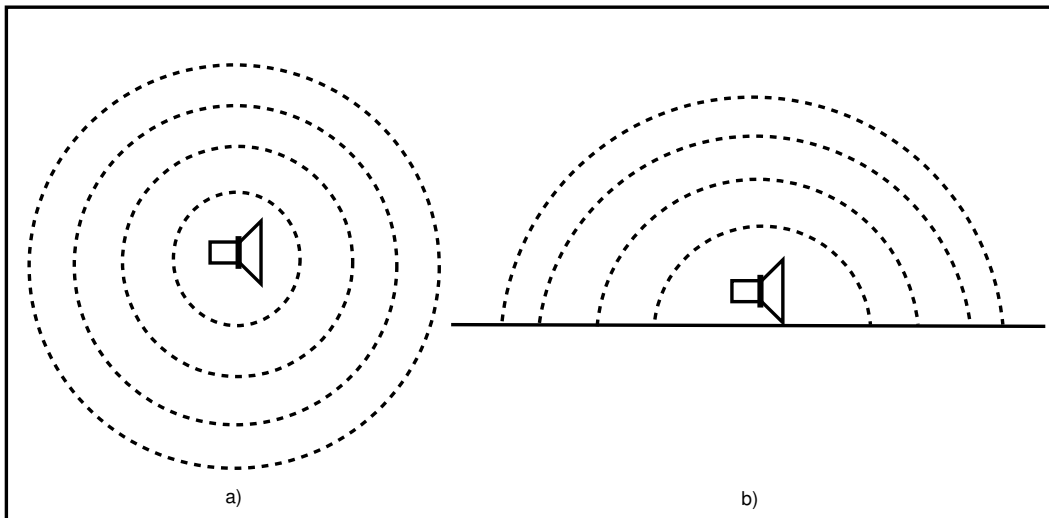
Ajatellaan ilmakehä homogeeniseksi ja isotrooppiseksi. Kun ääni lähtee pistemäisestä lähteestä, se etenee pallomaisena rintamana ympäristöönsä, ks. kuva 2.1a. Tällöin äänilähteen energia jakautuu yhä suuremmalle pinta-alalle, jolloin etäällä kuultava ääni on vaimeampi kuin lähteen vieressä kuultava ääni.

Geometristä leviämistä voidaan kuvata kaavalla (2.2) [1].

$$A = 20G \log \frac{d_2}{d_1} \quad (2.2)$$

Kaavassa (2.2) d_2 ja d_1 ovat etäisyydet lähteestä. G :n arvo riippuu siitä, minkälaisessa tilassa ääni etenee. G on nolla tasoaallolle, puolikas viivalähteen sylinteriaallolle ja 1 palloaallolle. Yhtälön mukaisesti etäisyyden kaksinkertaistuessaa ääni vaimenee palloaallolla n. 6 dB ja vastaavasti esimerkiksi viivalähteellä n. 3 dB. [1]

Tähän työhön liittyvässä tutkimuksessa käytetään kaiuttimia, jotka sijaitsevat noin 1–2 metrin korkeudessa maanpinnasta. Voidaan karkeasti ajatella, että ääni leviää tällöin puoliavaaruuteen. Tilanne näkyy kuvasta 2.1b. Kuvassa ei ole otettu huomioon kaiutinten suuntaavuutta.



Kuva 2.1: Signaalin geometrinen leviäminen.

2.2 Ilmakehän ja sääolojen vaikutukset äänen etenemiseen

Ilmakehä aiheuttaa vaimennusta. Suurilla etäisyyksillä ilmakehän aiheuttama vaimeneminen on merkittävämpää kuin geometrinen leviäminen. Ilmakehän absorptio riippuu etenkin äänen taajuudesta, suhteellisesta kosteudesta, lämpötilasta tuulesta sekä ilmanpaineesta. Yleisesti pätee sääntö, jonka mukaan mitä suurempi äänen taajuus on, sitä suurempi on myös vaimennus. Siten pienitaajuiset äänet kuuluvat pisimmälle.

Vaimenemista tapahtuu mm. lämmön johtumisen vuoksi ja molekyylisten muutosten vuoksi, kun osa äänienergiasta muuttuu molekyylien värähtely- ja pyörimisenergiaksi. Näiden häviöiden suuruus riippuu voimakkaasti lämpötilasta ja ilmanpaineesta. Taajuus vaikuttaa häviöiden suuruuteen. Molekyyllisen värähtelyn suuruus riippuu myös ilmankosteudesta [1]. Myös ilman viskositeetti aiheuttaa vaimennusta, joka on suhteessa taajuuden neliöön. Tämä vaimennus on kokonaisuudessaan melko pientä. Jopa 5000 Hz taajuudella vaimennus on n. 0,5 dB sadalla metrillä. Siten viskositeetin aiheuttama vaimennus voidaan usein jättää huomiotta [2].

2.2.1 Tuuli

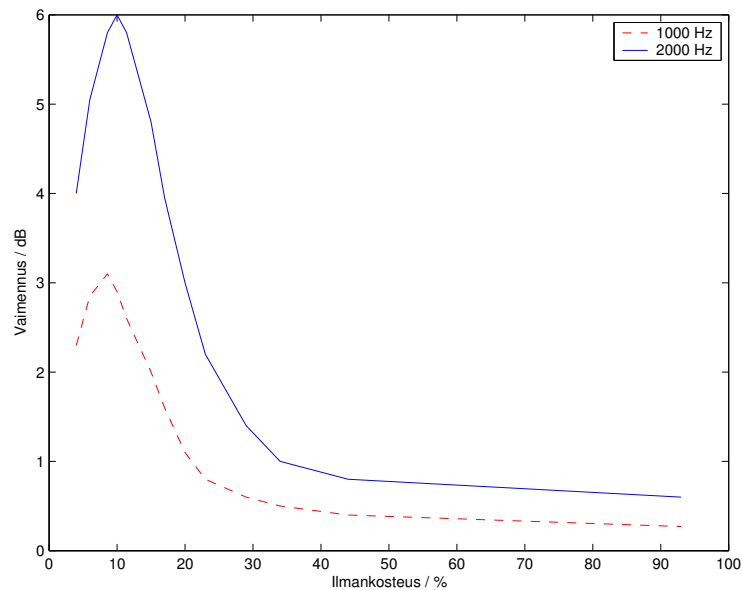
Sääolosuhteista merkityksellisin on tuuli. Tuulen vaikutus riippuu tuulen nopeudesta, puuskaisuudesta ja suunnasta. Tuuli lisää tai vähentää äänen vaimenemista varsinkin lyhyillä matkoilla tuulen suunnasta riippuen. 6–12 m/s tuuli voi vaimentaa ääntä 6 dB sataa metriä kohti. [2]

2.2.2 Turbulenssi

Turbulenssista seuraa äänisäteiden hajoaminen ja äänen vaimeneminen vastaanottopisteessä. Turbulenssi tarkoittaa ilman pyörteisyyttä, joka yleensä lisääntyy tuulen nopeuden kasvaessa. Äänen kannalta tämä tarkoittaa, että äänisäde taipuu pyörteeseen tullessaan ja siten saattaa ajautua pois reitiltä äänilähteestä vastaanottimeen. Pyörteet ovat yleensä kooltaan n. 2–8 m. Pitkillä matkoilla pyörteitä voi olla useita ja pyörteet voivat olla eri suuntiin, jolloin kokonaistaipuminen voi esimerkiksi hetkellisesti olla nolla. Turbulenssin määrä vaihtelee ajan funktiona, joten äänitaso voi vaihdella vastaanottopisteessä jopa 20 dB. Yleensä turbulenssin vaikutukset lisääntyvät tuulen nopeuden, äänen taajuuden sekä äänen etenemismatkan kasvaessa. Pienillä taajuuksilla ja muutaman sadan metrin etäisyyksillä turbulenssin voi yleensä jättää huomiotta. [2]

2.2.3 Suhteellinen kosteus

Mitä suurempi on ilman suhteellinen kosteus, sitä pienempi on vaimennus. Talvella hyvin kuivissa oloissa tämä ei kuitenkaan päde. Kuvassa 2.2 on esitetty suhteellisen kosteuden vaikutukset 1000 ja 2000 Hz taajuuksille.



Kuva 2.2: Äänen vaimentuminen ilman suhteellisen kosteuden funktiona. Yksikkönä on 1 dB / 100 m. [2]

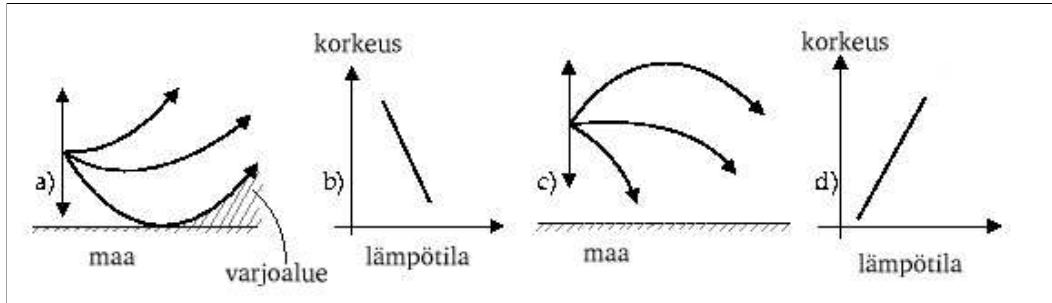
2.2.4 Lämpötila

Ääni kulkee kylmemmässä ilmassa hitaammin kuin lämpimässä. Äänen nopeuden muutosta voidaan estimoida kaavalla (2.3) [7]. Kaavassa T tarkoittaa lämpötilaa celsiusasteina.

$$c \approx 331,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} + 0,6T \frac{\text{m}}{\text{s}^{\circ}\text{C}} \quad (2.3)$$

Lämpötila muuttuu paitsi ajan, myös korkeuden funktiona. Yleensä päivällä maanpinta on lämpimämpi kuin ilmakehän ylemmät kerrokset. Tällöin lämpötila laskee korkeammalle mentäessä ja edetessään ääni kaartuu ylöspäin. Tilanne nähdään kuvassa 2.3 kohdissa a) ja b). Vastaavasti yöllä tilanne on yleensä päinvastainen. Tällöin maanpinta on ilmakehän ylempiä kerroksia kylmempi, ja äänisäteet kaartuvat alaspäin. Parhaiten ilmiö voidaan havaita esimerkiksi kevättalven aamuna, kun äänisäteet voivat näin saavuttaa uudelleen maan-

pinnan kaukanakin äänilähteestä. Tällaista tilannetta kutsutaan inversiotilanteeksi. Tilanteesta kertovat kuvan 2.3 kohdat c) ja d).



Kuva 2.3: Äänen kaartuminen ilmakehässä riippuu lämpötilaprofilista.

2.2.5 Sääoloihin liittyvistä etenemisvaimennustutkimuksista

Äänen etenemisvaimennusta pitkillä (1-10 km) matkoilla on tutkittu jonkin verran. Esimerkkinä kerrottakoon jo edellä mainitusta japanilaisten tekemästä tutkimuksesta ([5], [8]). Tutkimuksessa vaimennusta tutkittiin soittamalla kohinaa merellä olevalta tekosaarelta ja vastaanottamalla signaali rannikon puolella. Tutkimus oli laaja ja nauhoitukset kestivät vuoden (1989-1990). Mittausetäisyydet vaihtelivat yhdestä kuuteen kilometriin, ja meteorologista dataa kerättiin sekä lähetys- että vastaanottopisteistä. Kuitenkaan selviä tuloksia ei saatu siitä, miten mikäkin sääolosuhde (esimerkiksi tuulen nopeus, suunta tai kosteus) vaikuttaa vaimenemiseen. Analyysissä käytettiin todennäköisyyslaskentaa, kuten usean muutujan tilastollisia testejä. Syyksi yhteyden löytymättömyyteen arveltiin esim. turbulenssia, jota ei pyritty mittaamaan millään tavalla.

Tutkimuksessa saatiin kuitenkin käyttökelpoista tilastollista tietoa muun muassa etenemisvaimennuksen vaihtelusta. Suurimmillaan etenemisvaimennuksen vaihtelu oli yhden päivän aikana 40–50 dB, ja yhden tunnin aikana 20–30 dB [13]. Etenemisvaimennuksen vaihtelu kasvoi mittausetäisyyden kasvaessa.

Toinen esimerkki vastaavasta tutkimuksesta on Uppsalan yliopistossa tehty tutkimus. Tutkimuksessa muodostettiin tilasto siitä, mikä on todennäköisin arvo äänen sääoloista riippuvalle etenemisvaimentumiselle minäkin vuoden- ja vuorokaudenaikana. Tutkimuksessa kävi ilmi muun muassa, että suurin vaimentuminen on odotettavissa kesäkuukausina iltapäivisin ja pienin vaimentuminen talvikuukausina öisin. Kehitetty tietokoneohjelma otti syötteinä kosteuden ja lämpötilan, ja tämän perusteella laski absorptio [10], [11]. Mittaukset tehtiin savipellolla Ruotsissa.

2.3 Maanpinnan ja ympäristön vaikutukset äänen vaimenemiseen

Maanpinta vaimentaa ääntä, ja toisaalta heijastukset maanpinnasta voivat tietyissä pisteissä lisätä äänipainetasoa verrattuna pisteisiin, joihin saapuu ainoastaan suora ääni. Maanpohjat voidaan jakaa ominaisuuksiensa perusteella koviin ja absorboiviin. Täysin kova pohja heijastaa kaiken äänen, kun taas täysin absorboiva pohja vaimentaa kaikki heijastukset. Yleensä luonnossa esiintyvät maapohjat ovat absorboivia. Absorboiva maapohja on esimerkiksi hiekkainen savimaa, jossa on kasvustoa. Asfalttipinta taas luokitellaan kovaksi [14].

Maanpinnan muodot, erityisesti mäet, aiheuttavat varjoalueita taakseen. Suoran äänen eteneminen mäen taakse ei ole mahdollista. Kuitenkin esimerkiksi heijastusten tai ilmakehän lämpötilakerrosten aiheuttaman taipumisen takia ääni saatetaan kuulla varjoalueellakin [14].

Lisäksi puusto aiheuttaa vaimenemista. Mikäli äänen etenemismatkalla on lehtipuustoa, joka pudottaa lehtensä talveksi, vaimeneminen muuttuu vuodenajasta riippuen. Puiden lehdet aiheuttavat vaimenemista ja lisäksi ne sirottavat ääntä.

Luku 3

Mittausjärjestelmän kuvaus

Tähän työhön liittyvä mittausjärjestelmä on pystytetty Sodankylään. Lähetyspiste on Sodankylän lentokentällä, jossa sijaitsee torvikaiutinpino, bassokaiutin ja tarvittavat oheislaitteet. Vastaanottopiste on noin kolmen kilometrin päässä suolla. Runsaan puolen kilometrin päässä vastaanottopaikasta sijaitsee Ilmatieteen laitoksen sääasema, josta saadaan suurin osa sääaineistosta.

Äänen etenemismittaus suoritetaan kerran tunnissa vuorokauden ympäri viikon jokaisena päivänä. Lisäksi taustakohinatasoa mitataan useita kertoja tunnissa. Muu hankittava aineisto koostuu säähavainnoista, joita saadaan hyvin kattavasti suoraan lähetys- ja vastaanotto-paikoilta sekä läheiseltä sääasemalta. Mittauksia jatketaan vuoden tai kahden verran.

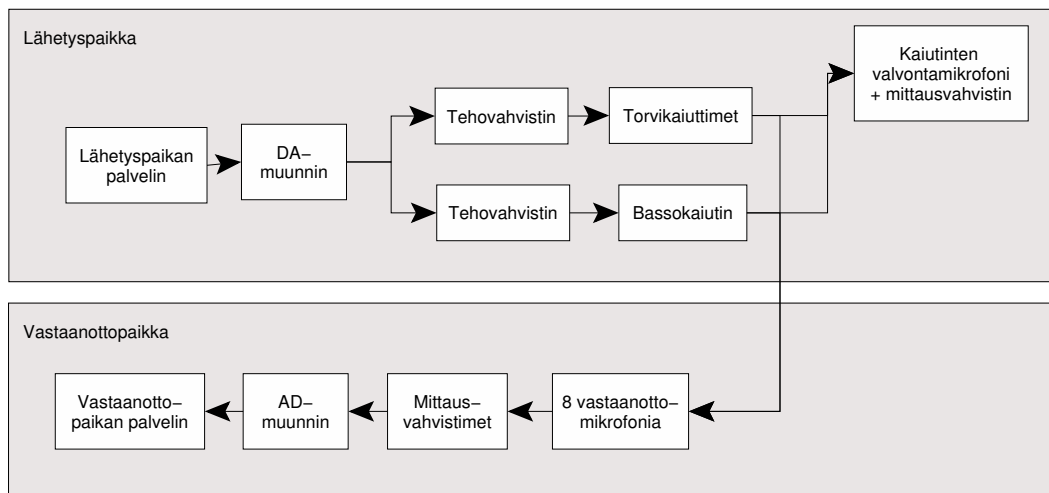
Paikan valinnassa on otettu huomioon se, että mittaukset häiritsisivät ihmisiä mahdollisimman vähän, maasto olisi tarkoitukseen sopiva ja säähavaintoja saataisiin kattavasti.

Tässä luvussa kerrotaan yleisellä tasolla, minkälaisesta mittausjärjestelmästä on kyse. Tarkemmin järjestelmä on kuvattu dokumentissa [3].

3.1 Laitteet ja mittausympäristö

3.1.1 Kaiuttimet ja mikrofonit

Mittausjärjestelmään liittyvät olennaisimmat laitteet näkyvät kaaviossa 3.1. Kaiuttimiin kuuluu torvikaiutinpino ja bassokaiutin. Torvikaiutinpinoissa on kahdeksan kaiutinta, kaksi vierekkäin ja neljä päällekkäin. Torvikaiuttimia käytetään taajuuksien 200–1600 Hz toistamiseen. Bassokaiuttimella toistetaan taajuuksia 40–160 Hz. Kaiuttimet näkyvät kuvassa 3.2.



Kuva 3.1: Mittausjärjestelmän laitekaavio



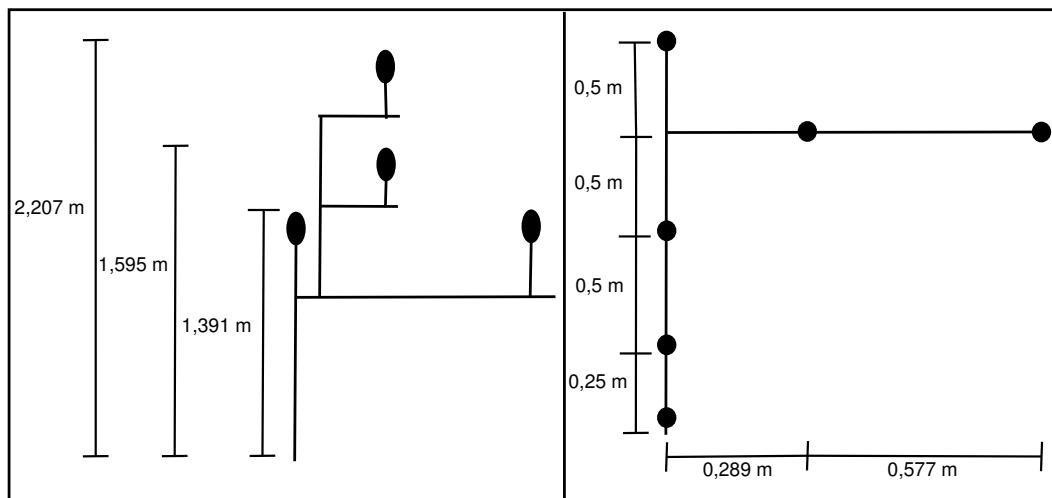
Kuva 3.2: Mittauksissa käytettävät kaiuttimet. Vasemmalla on bassokaiutin ja oikealla torvikaiutinpino.

Mikrofoneja on kahdeksan, mikrofoniin keskinäinen asettelu näkyy kuvasta 3.3 [3] ja mitat mikrofoniin välillä näkyvät kuvasta 3.4. Mikrofonit on aseteltu siten, että eri mikrofoniin käyttämällä saadaan selville esimerkiksi tulosuunta pysty- ja vaakasuunnassa ja mikrofoniin

korkeuden merkitys tuulikohinaan.



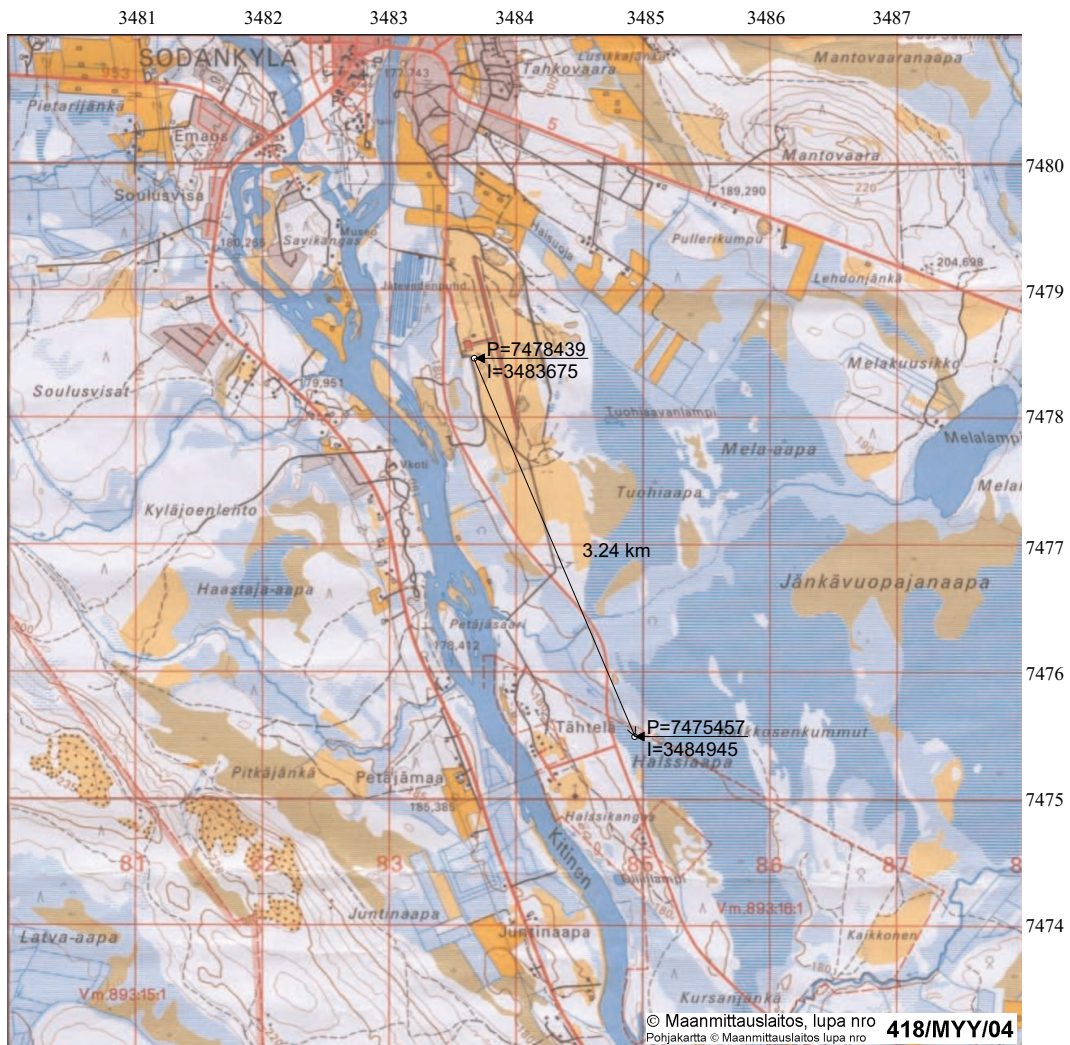
Kuva 3.3: Mikrofonit sijaitsevat suolla.



Kuva 3.4: Mikrofonien asettelu. Vasemmalla mikrofonien keskinäiset välimatkat sivulta katsottuna, oikealla päältä katsottuna.

3.1.2 Maasto

Lähetys- ja vastaanottoaikkojen välinen maasto on enimmäkseen tasaista. Matkalla kasvaa harvaa havumetsää ja osa välimaastosta on suota. Kuvassa 3.5 [3] on kartta maastosta.



Kuva 3.5: Kartta kaiutinten ja mikrofonien välisestä maastosta. Merkityistä pisteistä pohjoisempi on lähetyspiste ja eteläisempi mittauspiste.

3.1.3 Palvelimet

Palvelimet hoitavat ajastettuina mittaukset alusta loppuun. Lisäksi ne huolehtivat tukitoiminnoista, kuten tiedonsiirrosta ja vikailmoituksista.

Lähetyspalvelin

Lähetyspalvelin soittaa herätesignaalin kerran tunnissa. Ääni toistetaan kaksikanavaisena torvikaiuttimista ja bassokaiuttimesta. Signaalin äänitasoa muutetaan vuorokaudenajan ja sääolosuhteiden mukaan. Tavoitteena on soittaa ääni sellaisella tasolla, että se häiritsee mahdollisimman vähän alueen asukkaita, mutta kuuluu kuitenkin riittäväällä voimakkuudella mikrofoneihin. Lähetyspalvelin sijaitsee Sodankylän lentokentällä.

Äänityspisteen palvelin

Äänityspisteen palvelimelle on ajastettuna äänen etenemisen äänitykset sekä taustakohina-äänitykset. Taustakohinaa mitataan useita kertoja tunnissa.

Laskentapalvelin

Laskentapalvelin sijaitsee Tampereella. Palvelimella tehdään kaikki äänitteiden analyysiin liittyvä laskenta. Palvelin hakee tietyin väliajoin äänityspisteen palvelimelta äänitykset ja anemometrin aineiston, sekä erilaiset lokitiedostot molemmilta Sodankylän palvelimilta. Palvelimelle talletetaan myös sääaineisto, jonka Ilmatieteen laitos toimittaa.

Tiedonsiirrosta huolehtivat useat komentosarjat eri palvelimilla. Aineiston talletuksessa huolehditaan siitä, että tiedostojen nimeämiskäytäntö ja ascii-muotoisten tiedostojen tiedostomuodot ovat yhtenäiset. Näin mahdollistetaan tiedostojen automaattinen jälkikäsitteleminen ja analyysi.

3.2 Mittaustapahtuman kulku

Tutkimuksessa tehdään kahdenlaisia mittauksia: äänen etenemismittauksia ja taustakohinamittauksia. Äänen etenemismittauksissa selvitetään äänen etenemistä taajuusalueella 40 Hz–1600 Hz.

3.2.1 Äänen etenemismittaukset

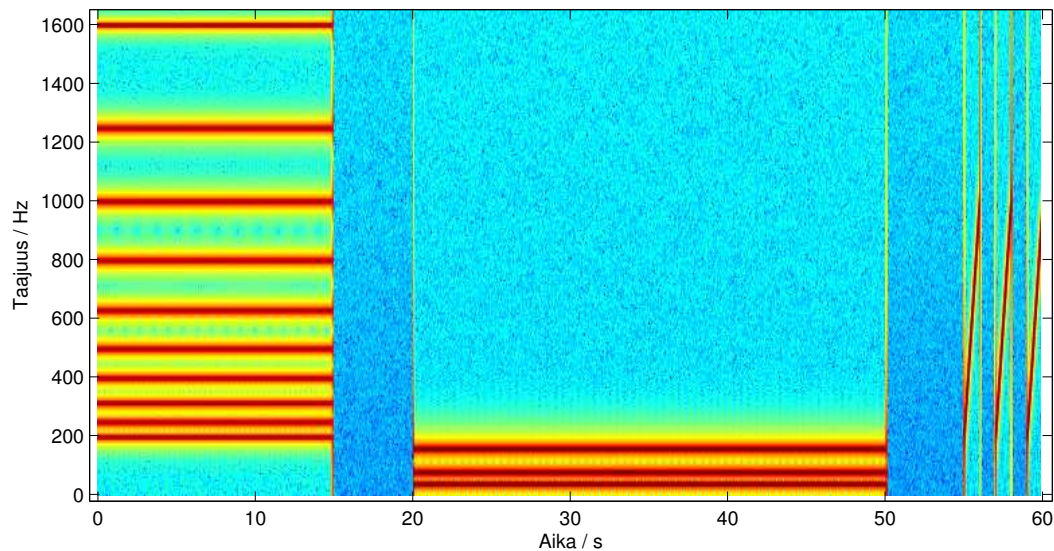
Herätesignaali

Herätteenä käytetään signaalia, jossa on eri taajuuksilla sinisignaaleja sekä sinipyyhkäisyjä. Sinisignaalien taajuudet ovat terssikaistojen keskitaajuuksia. Taajuudet on lueteltu taulukossa 3.1. Eri taajuuksisia sinisignaaleja käytetään, jotta saataisiin selville etenemisvaimennus

eri terssikaistoilla. Myös etenemisviive olisi haluttu selvittää erikseen eri terssikaistoille, mutta kuten signaalianalyysiluvussa kerrotaan, menetelmällä ei saavutettu riittävää tarkkuutta ja luotettavuutta. Niinpä etenemisviive päätettiin selvittää sinipyyhkäisyjen avulla. Samoin suunta-analyysi perustuu sinipyyhkäisyjen ja ristikorrelaation käyttöön.

Taulukko 3.1: Herätesignaalin sinitaajuudet hertseinä

Bassokaiuttimen taajuudet										
40	80	160								
Torvikaiutinten taajuudet										
200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	



Kuva 3.6: Herätesignaalin spektrogrammi. Alussa soitetaan sinisignaaleja taajuusalueella 200 Hz–1600 Hz, tämän jälkeen taajuusalueella 40 Hz–160 Hz ja lopuksi soitetaan kolme sinipyyhkäisyä. Kuvan värit kertovat äänitason voimakkuudesta. Punainen tarkoittaa voimakkainta ääntä, tämän jälkeen tulee keltainen ja pienintä voimakkuutta edustaa sininen.

Herätesignaalin spektrogrammi on esitetty kuvassa 3.6. Alussa herätesignaalinsoitetaan yhtä aikaa sinisignaaleja terssikaistoittain taajuusalueella 200 Hz–1600 Hz. Näiden sinisignaalien osuus kestää 15 s ja signaalit soitetaan torvikaiuttimista. Tämän jälkeen seuraa viiden sekunnin hiljaisuus, jonka jälkeen soitetaan bassokaiuttimesta kolmea sinisignaalia taajuuksilla 40 Hz, 80 Hz ja 160 Hz. Bassokaiuttimen osuus kestää 30 s, jota seuraa jälleen viisi sekuntia hiljaisuutta. Tämän jälkeen soitetaan kolme sinipyyhkäisyä, jotka nouse-

vat taajuudesta 200 Hz taajuuteen 1000 Hz. Kesä-elokuussa 2004 pyyhkäisy olivat kukin 0,3 s pituisia ja seurasivat peräkkäin toisiaan. Syyskuussa pyyhkäisyjen kesto muutettiin yhteen sekuntiin ja niiden väliin laitettiin sekunnin tauko. Muutoksella saavutettiin parempi signaali-kohinasuhde ja tauon lisäämisellä päästiin eroon jälkikaiun vaikutuksista seuraavaan pyyhkäisyyn. Jälkikaiunnalla tarkoitetaan tässä luonnon aiheuttamia äänen heijastuksia esim. maanpinnasta tai inversioerroksesta.

Äänen etenemisen mittaustapahtuma

Äänen etenemisen mittaustapahtumat toistuvat tunnin välein. Ennen varsinaista mittausta tarkistetaan laitteiden toimivuus. Kaiutinten kunto tarkistetaan soittamalla kaiuttimista testisignaali, joka nauhoitetaan noin kymmenen metrin päässä olevalla mikrofonilla. Vastavasti vastaanottopaikan mikrofonien kunto taas kokeillaan automaattikalibroinnilla (Charge injection calibration).

Mittaustapahtumassa ääni toistetaan lähetyspisteen kaiuttimista tietyllä äänenvoimakkuudella. Äänitys käynnistetään suolla samanaikaisesti. Äänitystä jatketaan toiston ajan ja lisäksi otetaan huomioon äänen 3 km:n etenemisaika (vajaat kymmenen sekuntia). Äänitetty aineisto talletetaan ja siirretään myöhemmin laskentapalvelimelle analysoitavaksi.

3.2.2 Taustakohinamittaukset

Taustakohinaa äänitetään useita kertoja tunnissa, aina kerrallaan minuutin ajan. Mittaus tehdään kahdella kanavalla, jotta voidaan verrata taustakohinan tasoa eri korkeuksilla. Tuulikohinan osuus kasvaa huomattavasti mittauspisteen ollessa korkeammalla. Alemman mikrofonin efektiivinen korkeus on noin 1,3 m ja korkeammalla olevan noin 2,1 m.

3.3 Aikasynkronian hallinta

Yksi etenemismittausten tavoitteista on saada selville äänen kulkuaika kaiuttimista mikrofoneille eri sääoloissa. Jotta aika voitaisiin mitata riittävällä tarkkuudella (virhe < 10 ms), on lähetyks- ja äänityspalvelinten kellojen käytävä täsmälleen samaa aikaa, tai ainakin mittaustajajärjestelmän sisäinen viive ja palvelinten aikaeroavaisuudet on saatava mahdollisimman pieniksi ja tunnetuiksi.

Projektissa päädyttiin käyttämään NTP:tä (Network Time Protocol) aikasynkronointiin. Protokolla perustuu siihen, että kone hakee ajan usealta hyvin tarkalta, erityiseltä aikapalvelimelta. Protokollassa otetaan huomioon myös verkkoyhteyksien viiveet aikapalvelimeen

nähdén. Synkronointi tapahtuu säännöllisin aikavälein. Virhettä aikapalvelimeen verrattuna arvioidaan, ja projektissa nämä virheet kirjoitetaan tiedostoon tunnin välein¹.

Toinen tärkeä asia ajan hallinnassa on tietää toiston ja äänityksen tarkka alkamisaika, jotta äänitteestä voidaan luotettavasti selvittää esim. äänen etenemisaika kaiuttimilta mikrofoneille. Ongelma aiheutui siitä, että ajastettujen äänitysten ja lähetysten todellinen alkamisaika vaihteli jopa kaksi sekuntia. Tällaisessa tilanteessa etenemisviiveen määrittystä ei olisi voinut tehdä. Ongelma ratkaistiin muokkaamalla käytettävän toisto- ja äänitysohjelman lähdekoodia ja lisäämällä sinne aikaleiman kirjoittaminen tiedostoon. Aikaleimana otetaan ajankohta juuri ennen varsinaisen toiston tai äänityksen alkamista.

Ajan hallinnan onnistumista ja tarkkuutta arvioitiin tekemällä äänitysviivetesti. Palvelinten viiveellä tarkoitetaan tässä sekalaisista tekijöistä johtuvaa aikaa, joka jää, kun yllä kuvailut asiat otetaan huomioon aikasyntonian hallinnassa. Testissä äänitysviiveen keskiarvoksi saatiin -0,69 ms ja hajonnaksi 0,70 ms. Tämä on riittävä tarkkuus etenemisviiveen selvittämiseen.

3.4 Säähavainnot

Säähavainnot ovat olennainen osa mittauksia. Sääaineisto saadaan Ilmatieteen laitokselta, sekä anemometriltä ja ilmakehätutkalta (sodar). Mallintamisivaiheessa sääaineisto liitetään äänen etenemismittauksista saatuihin tietoihin.

Olenneisimmat äänen etenemiseen liittyvät säähavainnot ovat tuuliolosuhteet, lämpötila, kosteus ja maanpinnan laatu.

Tuuliolosuhteet saadaan selvitettyä hyvin kattavasti. Vastaanotto paikalla on 2 m korkeudessa anemometri, joka mittaa vastaanotto paikan tuulen nopeutta ja suuntaa 10 kertaa sekunnissa. Runsaan puolen kilometrin päässä vastaanotto paikalta sijaitsevasta Ilmatieteen laitoksen mastosta taas saadaan tuulen nopeuden eri komponentit ja turbulenssin intensiteetti arvot 48 m korkeudelta 10 minuutin välein. Kahdesti päivässä tehtävällä luotausmittauksella tuulen nopeus saadaan selvitettyä korkeuksilla 180 m – 2200 m.

Vastaanotto paikan anemometri mittaa myös lämpötilaa. Mittaus tapahtuu virtuaalisesti, eli ultraäänien nopeuteen perustuen. Toisaalta lämpötila saadaan mastosta 48 m korkeudelta, ja luotausmittauksista eri korkeuksilta. Ilmatieteen laitos toimittaa lämpötilan myös maanpinnan korkeudelta kolmen tunnin välein.

Ilman suhteellinen kosteusprosentti saadaan luotausmittauksista eri korkeuksilta kahdesti

¹Lisää tietoa NTP:stä osoitteessa www.ntp.org

päivässä. Toisaalta kosteusprosentti saadaan myös laskettuna arvona 3 tunnin välein. Samoin sademäärä ilmoitetaan kolmen tunnin jaksoissa.

Lisäksi saadaan säähavaintoja monista muista vähemmän tärkeistä asioista äänen etenemisen kannalta. Mm. saadaan tieto maanpinnan laadusta, joka tarkoittaa lähinnä tietoa vaihemiseen vaikuttavasta lumipeitteestä. Lumipeitteen paksuudesta saadaan tieto kolmen tunnin välein. Ilmakehätutkalla (sodar) taas selvitetään inversiokerroksen korkeus.

3.5 Mittausjärjestelmän tukitehtävät

Varsinaisten mittausten lisäksi mittausjärjestelmän tulee huolehtia luotettavasti tiedonsiirrostä ja toipua yksinkertaisista virhetilanteista. Näitä ovat esimerkiksi lyhyt sähkökatko. Hankalammista vikatilanteista, kuten pitkästä verkkokatkosta, järjestelmä ilmoittaa ylläpitäjälle. Näin mikään ongelma ei pysäytä järjestelmän toimintaa pitkäaikaisesti. Järjestelmä myös huolehtii varmuuskopioinnista. Samoin järjestelmän toiminnan raportointi kuuluu järjestelmän tehtäviin. Tämä tarkoittaa sitä, että järjestelmän eri toiminnoista tehdään lokeja, joita voi jälkeenpäin tutkia. Näitä ovat muiden muassa mikrofoniin ja kaiutinten toiminnallisuuden seuraaminen sekä aikasynkronointiin liittyvät lokitiedostot.

Luku 4

Signaalianalyysi

Tavoitteena analyysissä on saada laskettua mittausaineistosta kattava määrä arvoja siten, että laskettuja arvoja ja säähän liittyvää aineistoa vertaamalla saadaan selville riippuvuudet mittauksista laskettujen arvojen ja sääolosuhteiden välillä.

Analyysi suoritetaan Matlab-ohjelmalla. Analyysiohjelmistoon kuuluu joukko Matlab-funktioita, joita pääohjelma kutsuu. Analyysin voi ajaa suurelle aineistomäärälle kerralla. Ohjelmistolle annetaan tällöin parametrinä haluttu mittausten ajanjakso. Aineistoa on paljon, ja manuaalinen läpikäyminen onnistuu järkevän ajan puitteissa vain pienelle osalle aineistoa. Siksi analyysi on voitava ajaa automaattisesti.

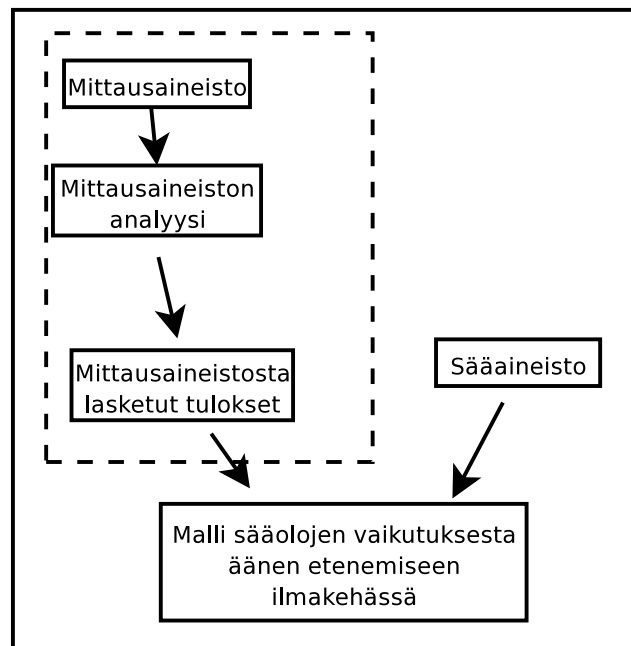
Analyysituloksiin liittyy luotettavuudesta kertovia indikaattoreita. Esimerkiksi huono signaali-kohinasuhde heikentää tulosten luotettavuutta. Samoin, jos tulokset poikkeavat voimakkaasti odotetusta, voidaan epäillä, että äänitteessä on ollut jokin häiriöääni, kuten auton, moottorikelkan tai helikopterin ääni. Analyysiohjelmiston tehtävä ei kuitenkaan ole tehdä päätöstä tulosten käyttökelpoisuudesta. Kyseisen päätöksen tekee tulosten käyttäjä.

Analyysi suoritetaan äänen etenemismittauksille sekä taustakohinamittauksille. Sääaineistoa ei oteta mukaan analyysiin vielä tässä vaiheessa, vaan sääaineiston ja mittaustulosten vastaavuutta mallinnetaan tutkimuksen myöhemmässä vaiheessa, katso kuva 4.1.

Analyysi jakautuu neljään osaan: taustakohina-analyysiin, etenemisvaimennusanalyysiin, etenemisviiveanalyysiin ja suunta-analyysiin.

4.1 Yleistä analyysiohjelmistosta

Analyysiä kontrolloivat parametrien määrittely- ja pääohjelmafunktiot. Jokaiseen analyysiin liittyy oma funktionsa. Lisäksi ohjelmistoon kuuluu lukuisia perustason funktioita, joi-



Kuva 4.1: Aineistosta tuloksiin. Katkoviivan sisällä oleva osuus kuuluu tähän työhön.

ta edellä mainitut funktiot kutsuvat, ja jotka mm. laskevat signaalitasoa, tai suodattavat tai ikkunoivat signaalia.

Analyysi tehdään aina tietyn aikavälin mittauksille. Samalla kertaa voidaan ajaa kaikki analyysit tai vain tietty analyysi. Analyysejä voidaan ajaa komentoriviltä.

4.1.1 Analyysin toimivuuden ja tarkoituksenmukaisuuden testaus

Kaikkien analyysien tekoon liittyi myös analyysin toiminnallisuuden testaaminen. Matlab-koodien toimivuutta testattiin ohjelmoinnin yhteydessä testiajoilla ja syöttämällä testiheräteitä. Analyysikokonaisuuksien koodien toimivuus testattiin antamalla valmiisiin analyysiin syötteenä herätesignaali. Lisäksi koodin toimivuus testattiin kalibrointisignaaleilla. Näin saatiin testattua, ovatko muunnokset suhteellisista tasoista absoluuttisiin tasoihin oikeita.

Toinen testaamisen osuus liittyi analyysien tarkoituksenmukaisuuteen. Analyysejä käytetään tietyssä mittausjärjestelmässä, ja on oleellista tietää, kuinka suuresta osasta mitattuja signaaleja analyysi saa aikaan hyväksyttävän tuloksen.

Testauksesta on kerrottu lisää kunkin analyysin yhteydessä.

4.2 Taustakohina-analyysi

Taustakohina-analyysin tarkoituksena on tuottaa aineisto taustakohinan vaihtelusta ajan funktiona. Tuotettua aineistoa käytetään tutkimuksen myöhemmässä vaiheessa, kun mallinnetaan sääolosuhteiden ja taustakohinan vastaavuuksia. Taustakohinamittauksia tehdään n. kolme kertaa tunnissa minuutin äänitys kerrallaan. Lisäksi taustakohinatietoa saadaan äänen etenemismittauksien alusta, siltä ajalta, kun signaali ei ole vielä saapunut vastaanotto-päähän.

Taustakohinaa voidaan mallintaa esimerkiksi aika-taajuusalueessa, tai käyttäen parametrisia malleja, kuten ARMA¹-mallia. Parametrisessa mallissa mallinnus tehdään lineaarikombinaationa edellisten arvojen perusteella. Tässä työssä päädyttiin käyttämään kuitenkin aika-taajuusalueen mallia. Malli on yksinkertainen, ja eri analyysien arvoja on helppo verrata toisiinsa.

Sopivaksi taajuusresoluutioksi päätettiin terssikaistoihin jako. Tämä jako noudattaa samaa linjaa varsinaisten äänen etenemismittausten kanssa, sillä äänen etenemismittauksissa herätteen sinisignaali on terssikaistojen päässä toisistaan. Tasoja lasketaan terssikaistoilla 40 Hz–5000 Hz.

Aikaresoluutioksi valittiin 200 ms. Teknisissä sovelluksissa käytetään usein tämän aikaluokan resoluutiota (esimerkiksi Fast-aikapainotus). Myöhemmässä mallinnuksessa voidaan haluttaessa siirtyä käyttämään pidempää aikatason integrointia.

Tasolaskennan tulokset talletetaan ascii-muotoisiin tiedostoihin.

4.2.1 Tasojen laskeminen

Tasojen laskemisella tarkoitetaan signaalin tehollisarvon eli ns. RMS²-arvon laskemista halutulle signaalille. Taso lasketaan kaavan (4.1) [9] mukaisesti. Kaavassa ajan funktiona ilmaistu äänipainetaso muutetaan desibeleiksi.

$$L_p = 20 \log_{10} \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt} \quad (4.1)$$

Tasolaskennassa otetaan myös huomioon äänitetyn kanavan mikrofonin kulloinenkin kalibrointiarvo. Näin tulokseksi saadaan absoluuttisia tasoja suhteellisten sijaan, ja eri kanavista laskettuja tasoja voidaan verrata keskenään.

¹Autoregressive Moving Average

²Root-Mean-Square

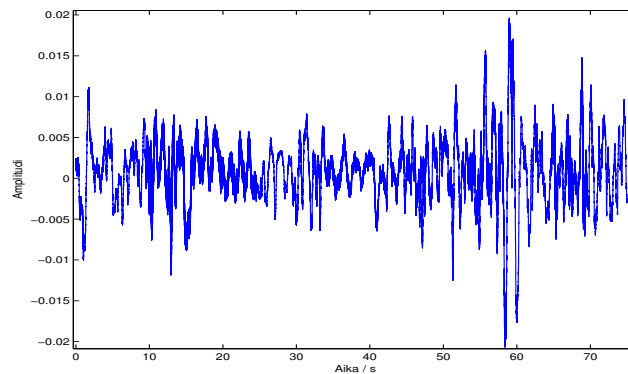
4.2.2 Suodatus

Taustakohina-analyysissä tarkastellaan kerrallaan yhtä terssikaistaa. Muiden taajuuksien poistamiseen tarvitaan kaistanpäästösuodin. Tavallisimpia suotimia ovat Butterworth-suotimet sekä FFT-pohjaiset suotimet. Butterworth-suotimien etuna on pienemmät laskennalliset vaatimukset kuin FFT:ssä. FFT-suotimella saadaan toisaalta suodatettua hyvin tarkkaan rajattu taajuuskaista. Analyysissä päädyttiin käyttämään FFT:tä suodatuksessa taajuustarkkuuden vuoksi.

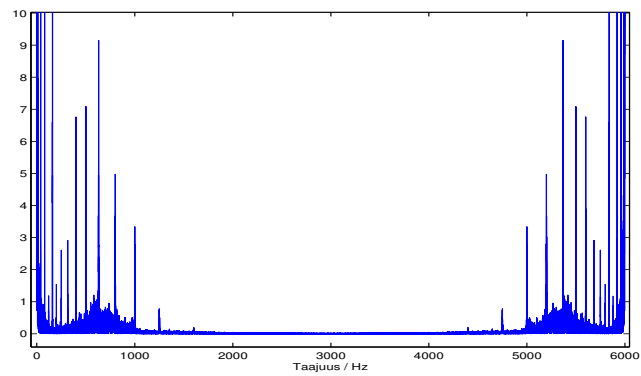
Suodatus tehdään koko vasteelle kerrallaan. Näin aikaikkunointiin liittyvät katkaisuvaikutukset jäävät mahdollisimman pieniksi, ja vaikutukset voidaan hoitaa vasteen alku- ja loppupään ikkunoinnilla. Ikkunointi on kuvattu kohdassa 4.2.3.

Suodatus vaihe vaiheelta

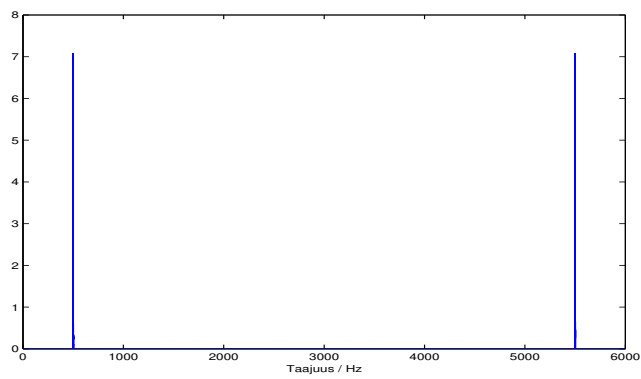
Suodatuksen ensimmäisessä vaiheessa aikatason signaali Fourier-muunnetaan, jolloin signaalia pystytään käsittelemään taajuustasossa. Signaalin taajuusesityksestä poistetaan muut taajuudet, paitsi haluttu signaali- ja vastaavat negatiiviset taajuudet. Suodatuksen päätteeksi signaali muunnetaan takaisin aikatasoon käänteisellä Fourier-muunnoksella. Kuvissa 4.2 – 4.5 on tehty esimerkkisuodatus, eräästä vastesignaalista on kaistanpäästösuodatettu kaista 495 Hz-505 Hz.



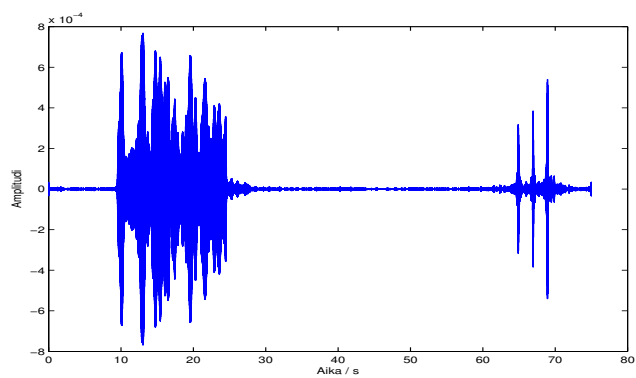
Kuva 4.2: Suodatettava signaali aikatasossa.



Kuva 4.3: Signaalin Fourier-muunnoksen itseisarvo



Kuva 4.4: Fourier-muunnoksesta on poistettu muut taajuudet paitsi haluttu taajuuskaista.

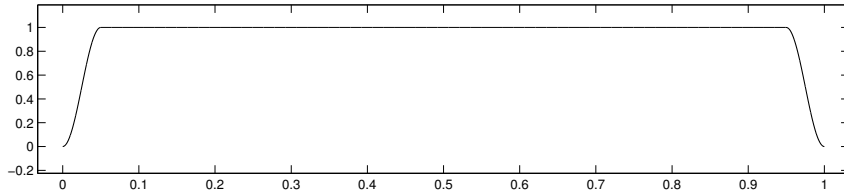


Kuva 4.5: Käänteis-Fourier-muunnettu suodatettu signaali aikatasossa.

4.2.3 Ikkunointi

Kun signaali jaetaan tasolaskennassa aikakehyksiin, katkaisukohtaan voi aiheutua katkaisuefekti, joka vaikuttaa laskettuun signaalitasoon. Efektin poistamiseksi jokainen aikakehyks ikkunoidaan. Ikkunoinnilla tarkoitetaan tässä tapauksessa signaalin päiden pyöristämistä. Päätt ikkunoidaan hanning-ikkunan puolikkaalla. Käytetty ikkuna on kuvattu kaavassa (4.2) [12] ja kuvassa 4.6. Kaavassa l kuvaa koko aikakehyksen pituutta, hanning-ikkunoinnin alusta täyden signaalitehon kautta loppupään hanning-ikkunointiin. Symboli n taas kuvaa ikkunoitavan osan (aikakehyksen alun tai lopun) pituutta.

$$\begin{aligned} w[i] &= \frac{1}{2} * \left(1 + \cos \frac{2\pi(i+l-n)}{2n+1} \right) , -l \leq i \leq -l+n \\ w[i] &= 1 , -l+n < i < l-n \\ w[i] &= \frac{1}{2} * \left(1 + \cos \frac{2\pi(i-l+n)}{2n+1} \right) , l-n \leq i \leq l \end{aligned} \quad (4.2)$$

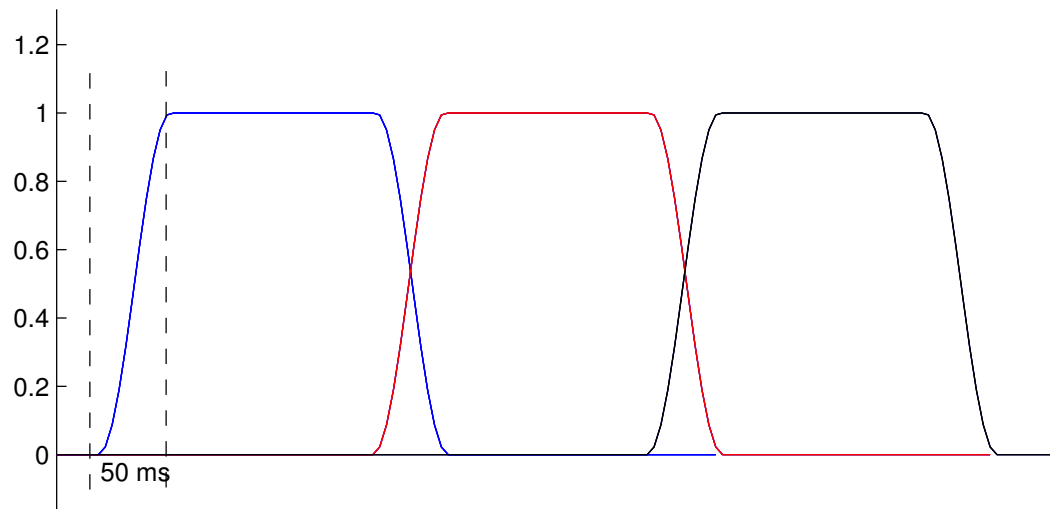


Kuva 4.6: Tasolaskennassa käytettävä painotusikkuna, jonka päät ovat hanning-ikkunan puolikkaan muotoiset.

Analyyseissä pienin analysoitava taajuus on yleensä 40 Hz, joten ikkunoinnin pituudeksi riittää molemmissa tapauksissa 50 ms. Pelkän signaalin päiden pyöristämisen lisäksi aikakehykset laitetaan limittäin siten, että ikkunat menevät ristikkäin ikkunoinnin puolen amplitudin pisteen kohdassa. Tällä tavoin vaimennettujen osien painoarvo koko signaalin tasolaskennassa säilyy samana kuin vaimentamattomienkin osien. Limittyminen näkyy kuvassa 4.7.

Suotuisten vaikutusten lisäksi ikkunointi vaikuttaa tasolaskennan tuloksiin pienentämällä tasoja. Tämä vaimennus on laskettavissa, ja vaimennus voidaan ottaa huomioon tasolaskennassa.

Taustakohina-analyysissä vaimentamattoman osan pituus on 200 ms. Ikkunoitavan pään pituus taas on 50 ms kummassakin signaalin päässä. Ikkunoinnin vaikutus voidaan laskea integroimalla yhden ikkunan yli ja vertaamalla saatua arvoa ikkunoimattomaan arvoon. Tu-



Kuva 4.7: Tasolaskennassa aikakehykset laitetaan limittäin.

los on luonnollista ilmoittaa desibeleinä, koska myös tasolaskennan tulokset ilmoitetaan desibeleinä.

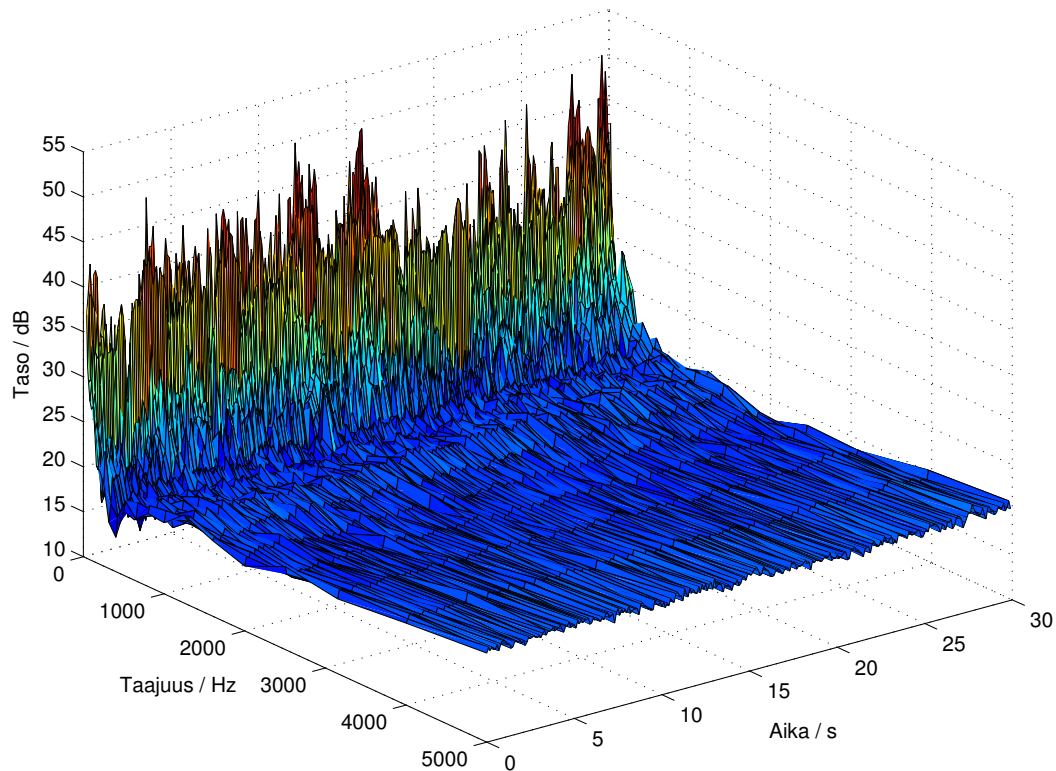
4.2.4 Testiajot

Kuvassa 4.8 on esitetty esimerkkitapaus taustakohina-analyysin tuloksista. Tasojen arvot on luettu tulostiedostosta ja piirretty kuvaan ajan ja taajuuden funktiona. Esimerkkimittauksessa ei ole ollut erityisiä häiriötekijöitä. Kuvasta voidaan nähdä tuulikohinan vaikutus, joka on suurinta pienillä taajuuksilla. Tuulikohinan taso on kääntäen verrannollinen taajuuteen, eli taajuuden kasvaessa tuulikohina vähenee.

Taustakohina-analyysille tehtiin myös kaksi testiajoa. Toisessa testiajossa taustakohina-analyysi ajettiin kesäkuun ensimmäisen viikon mittauksille (1.6.-7.6.2004), ja toisessa lokakuun viimeisen viikon mittauksille (25.-31.10.2004). Kuvissa 4.9 ja 4.10 on esitetty taustakohinajakauma kahdelle terssikaistalle kesäkuun alun mittauksista, ja kuvissa 4.11 ja 4.12 on esitetty vastaavat kuvaajat lokakuun lopun mittauksille. Mittaukset on tehty mikrofonilla, joka on 1,4 m korkeudella maanpinnasta.

4.2.5 Matlab-koodin testaus

Matlab-koodin toimivuuden lopputestaus tehtiin syöttämällä taustakohinalaskentaan heräte. Kun taustakohina-analyysissä käytettiin hanning-ikkunointia, saadut arvot poikkesivat oi-

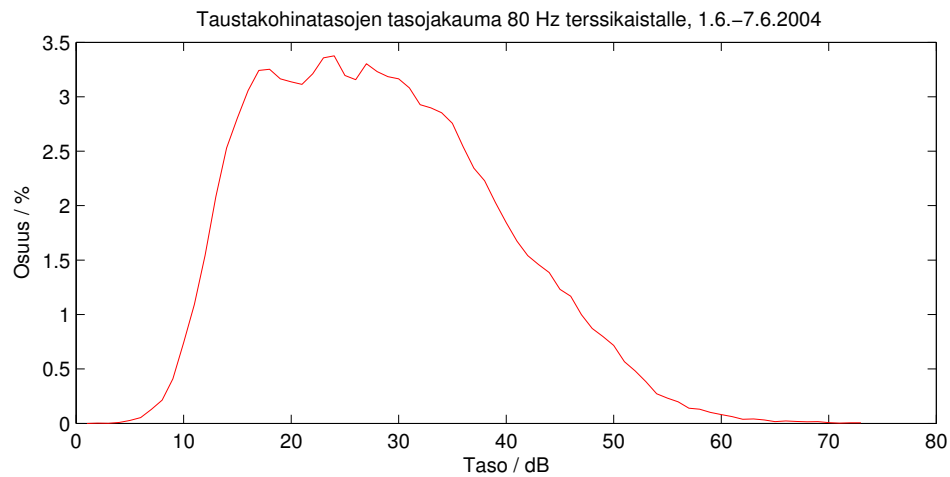


Kuva 4.8: Taustakohina-analyysin tulokset esitettynä kolmiulotteisesti. Kyseisen mittaustapahtuman aikana ei ole ollut häiriöitä. Taso on laskettu terssikaistoittain. Taajuusakselilla on myös kyse terssikaistoista, arvo on piirretty aina terssikaistan keskitaajuuden kohdalle.

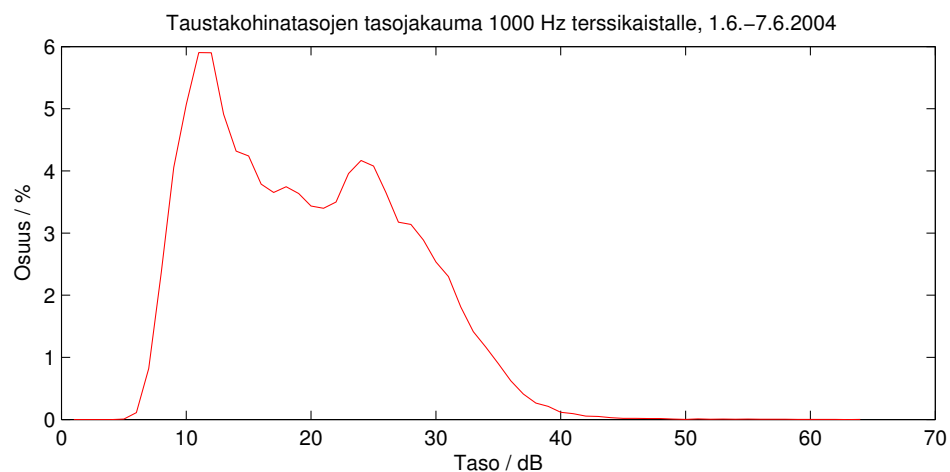
keista arvoista 1,2 dB. Testiä muutettiin siten, että testissä käytettiin suorakulmaikkunointia. Tällöin erot oikeisiin arvoihin olivat alle 0,01 dB alle 200 Hz taajuuksilla ja 0,02 dB yli 200 Hz taajuuksilla. Tästä voidaan päätellä, että tasoarvojen poikkeamat oikeista tasoista johtuivat juuri hanning-ikkunoinnista. Ikkunoinnin aiheuttama vaimennus voidaan siten ottaa huomioon tulosten jälkikäsittelyssä.

4.3 Etenemisvaimennusanalyysi

Etenemisvaimennus lasketaan kaikista äänen etenemisen mittauksista. Laskennassa huomioidaan lähetys- ja vastaanottopalvelimen viiveet. Tärkein osuus liittyy kuitenkin vasteen tason laskemiseen äänitteestä. Katso kuvasta 4.13 tason muuttumisen vaiheet.



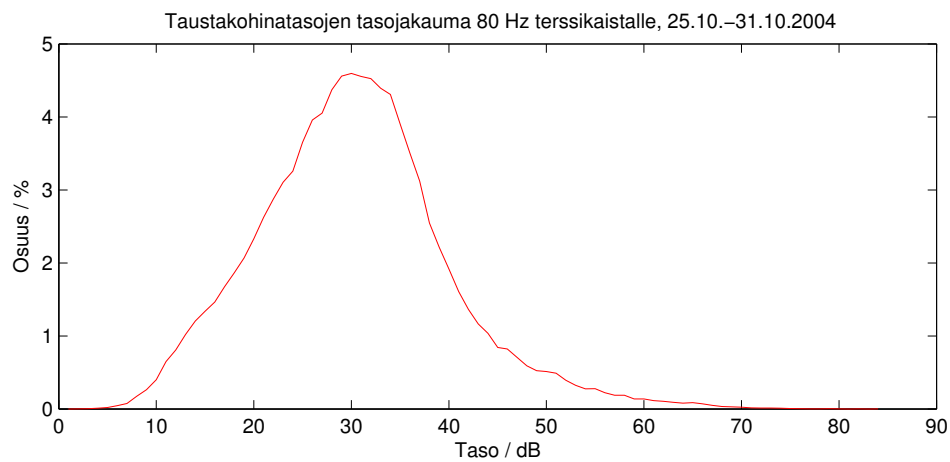
Kuva 4.9: Taustakohina-analyysin tasojakauma kesäkuun ensimmäiselle viikolle. 80 Hz terssikaista. Osuudet on laskettu yhden desibelin välein.



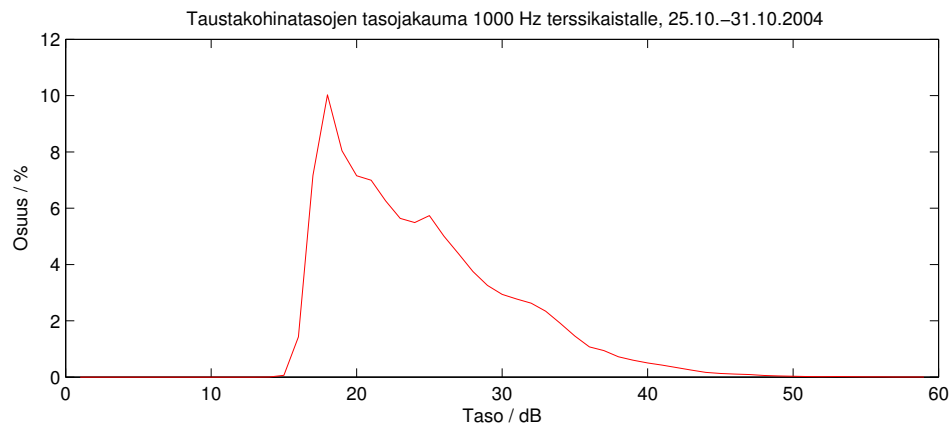
Kuva 4.10: Taustakohina-analyysin tasojakauma kesäkuun ensimmäiselle viikolle. 1000 Hz terssikaista. Osuudet on laskettu yhden desibelin välein.

Etenemisvaimennus halutaan tietää terssikaistoittain, joten se selvitetään jokaiselle herätteen sinitaajuudelle erikseen. Taso vaihtelee signaalin aikana jopa kymmeniä desibelejä, mutta tavoitteena ei ole saada tietoa siitä, minkälainen etenemisvaimennus on tietyn sekunnin aikana, vaan tietynä tuntina eli tietynlaisten sääolosuhteiden vallitessa. Suuri tasovaihtelu yhden mittauksen sisällä voi toisaalta kertoa esimerkiksi turbulenssista.

Etenemisvaimennus lasketaan kahdella tavalla. Taso lasketaan ensin koko sinisignaalin ajal-



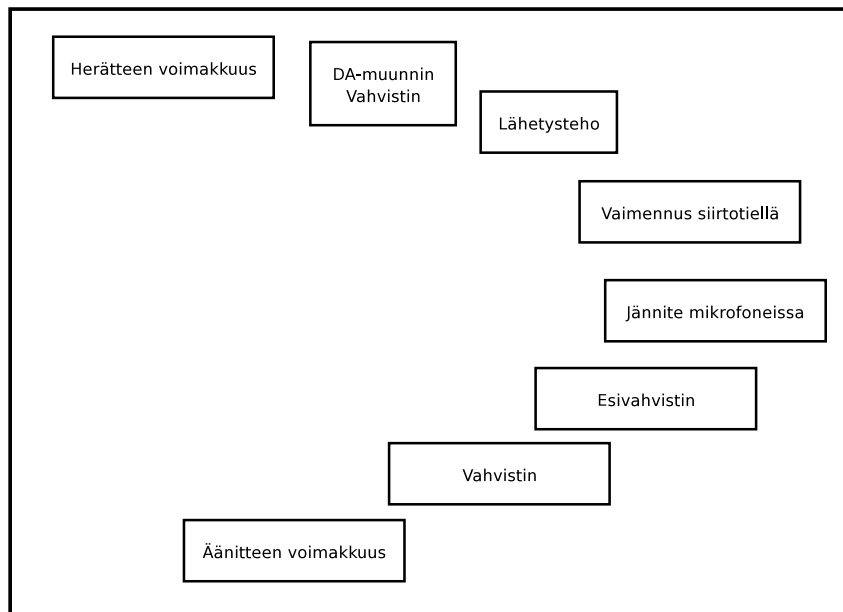
Kuva 4.11: Taustakohina-analyysin tasojakauma lokakuun viimeiselle viikolle. 80 Hz terssikaista. Osuudet on laskettu yhden desibelin välein.



Kuva 4.12: Taustakohina-analyysin tasojakauma lokakuun viimeiselle viikolle. 1000 Hz terssikaista. Osuudet on laskettu yhden desibelin välein.

ta laskettuna tehollisarvona. Toisaalta taso lasketaan myös lyhyissä aikakehyksissä. Ensimmäisellä tavalla laskettu tehollisarvo kuvaa tietyn ajanhetken (tässä tapauksessa tietyn tunnin) etenemisvaimennusta. Aikakehyksissä laskemisen tarkoituksena taas on selvittää, kuinka paljon yhden mittauksen sisällä on tasovaihtelua. Mikäli katsotaan tarpeelliseksi, hyvin paljon vaihteleva signaali voidaan myöhemmässä tutkimuksen vaiheessa jättää huomiotta. Molemmilla tavoilla saatuja tasoestimaatteja verrataan toisiinsa.

Vaimennusta laskettaessa huomiodaan, että signaalin saapumisaika vastaanotto paikalle vaihtelee. Saapumisaajan vaihtelualue on käytännössä noin sekunti. Tämän vuoksi siniosista jäte-



Kuva 4.13: Tekijät, jotka vaikuttavat äänipainetason muuttumiseen mittaustilanteen eri vaiheissa.

tään molemmista päistä sekunnin verran analysoimatta, jotta vaimennuslaskentaan ei tulisi mukaan sellaista osaa, jossa signaalia ei todellisuudessa olekaan.

Vaimennuksen kannalta olennaista on myös tietää, miten taustakohinataso on muuttunut mittauksen aikana. Tärkeintä on havaita häiriöt, kuten moottorikelkat tai läheisellä tiellä ajavat autot, jotka voivat aiheuttaa hyvinkin suuren tasomuutoksen ja siten myös virheellisen tasovaimennuksen estimaatin tietyillä taajuuskaistoilla.

Mittaussignaalin aikaista taustakohinatasoa tarkkaillaan siten, että äänitteestä poistetaan lähetetyt sinitaajuudet kaistanestosuotimella. Lisäksi poistetaan sinitaajuuksien harmoniset ja kaiutinten särökomponentit. Suodatuksen jälkeen signaaliin jää pelkkää taustakohinaa eri taajuuksilla. Taustakohinasta lasketaan tasoja terssikaistoittain puolen sekunnin aikakehyksissä. Tasoista päätellään, onko signaali-kohinasuhde ollut riittävä tasolaskentaan, ja kuinka paljon taustakohinataso on vaihdellut kyseisen mittauksen aikana.

4.3.1 Signaali-kohinasuhde ja häiriöiden vaikutukset

Signaali vaimenee ja muuttuu huomattavasti siirtotiellä, erityisesti tuuli- yms. kohinaa on vasteissa huomattava määrä. Tämän vuoksi tasoja laskettaessa on tärkeää tietää mittauksen signaali-kohinasuhde. Myöhemmässä tulosten mallinnuksessa tehdään päätökset siitä,

kuinka hyvä signaali-kohinasuhde vaaditaan, että laskettu tulos otetaan mukaan mallinnuksen aineistoon. Hyväksyttävän signaali-kohinasuhteen arvo vaihtelee myös eri analyyseissä.

Signaali-kohinasuhteen määrittäminen

Signaali-kohinasuhteen määrittäminen vastesignaalista voidaan tehdä esimerkiksi laske-
malla taustakohinataso signaalin siltä ajalta, kun mitattava signaali ei ole vielä saapunut
mittauspisteeseen, ja vertaamalla tätä taustakohinatasoa mittaussignaalin aikaiseen tasoon.
Tällöin oletetaan, että taustakohinataso ei vaihtelee olennaisesti mittauksen aikana. Mikä-
li signaali-kohinasuhde määritetään näin, tiedetään suoraan kohinan teho sekä mitattavan
signaalin teho, johon on summautunut kohinan teho.

Signaali-kohinasuhdearvion luotettavuutta voidaan lisätä selvittämällä, minkä verran taustakohinan taso muuttuu mittaushetken aikana. Tämän selvittämiseksi analyyseissä käytetään suodinta, joka suodattaa pois lähetettävät sinitaajuudet signaalista.

Signaali-kohinasuhteen määrittystä varten signaalin ja kohinan tehot erotetaan kokonaistehosta. Mittaussignaali ja kohina eivät ole keskenään koherentteja, joten niiden tehot summautuvat kaavan (4.3) mukaisesti. Kaavassa p_s tarkoittaa mittaussignaalin ja p_n kohinan äänipainetta vasteessa. Symboli p_x tarkoittaa vasteen kokonaisäänipainetta [9].

$$p_x^2 = p_s^2 + p_n^2 \quad (4.3)$$

Merkitään kokonaistehon ja kohinan välistä suhdetta a :lla,

$$\frac{p_x}{p_n} = a. \quad (4.4)$$

Halutaan tietää signaali-kohinasuhde, kun tiedetään kohinan ja kokonaistehon välinen suhde.

$$\sqrt{p_s^2 + p_n^2} = p_x \quad (4.5)$$

$$\sqrt{p_s^2 + p_n^2} = ap_n \quad (4.6)$$

$$p_s^2 = (a^2 - 1)p_n^2 \quad (4.7)$$

$$\frac{p_s}{p_n} = \sqrt{a^2 - 1} \quad (4.8)$$

$$\frac{p_s}{p_n} = \sqrt{\left(\frac{p_x}{p_n}\right)^2 - 1} \quad (4.9)$$

Näin on saatu kaavan (4.9) mukainen esitys kokonaistehon ja kohinan suhteen sekä signaali-kohinasuhteen välille.

4.3.2 Kaistanleveys

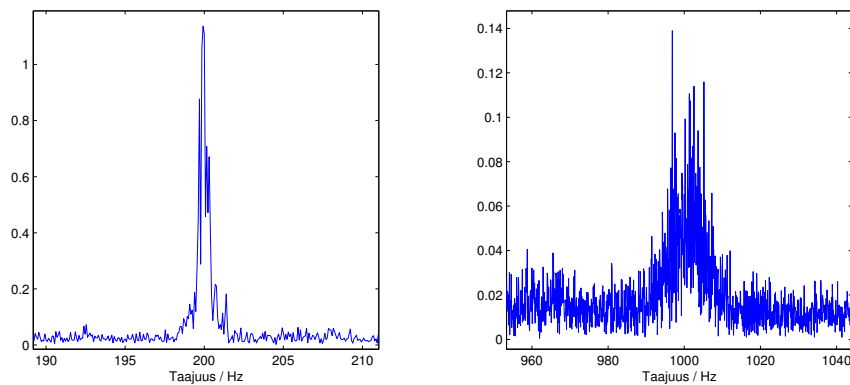
Vastesignaalista lasketaan etenemisvaimennus erikseen kullekin lähetettävälle sinitaajuudelle. Näitä taajuuksia on taajuuksilla 200 Hz–1600 Hz terssikaistoittain, ja bassotaajuuksilla taajuudet 40 Hz, 80 Hz ja 160 Hz.

Tasolaskennassa on tärkeää saada lasketuksi nimenomaan saapuneen sinisignaalin teho, ei taustakohinan tehoa. Häiriöiden vähentämiseksi sinisignaalin teho lasketaan mahdollisimman kapealla taajuuskaistalla. Kaistan on oltava vain niin leveä, että sinisignaali mahtuu kaistalle siirtotiellä tapahtuneesta taajuus- ja amplitudimodulaatiosta huolimatta. Lisäksi kaistanleveyden valinnassa tulee ottaa huomioon myös aika-taajuusresoluutio, josta on kerrottu seuraavassa kappaleessa.

Yksittäisen sinitaajuuden moduloitumista siirtotiellä selvitettiin valikoimalla mittauksista erilaisissa olosuhteissa tehtyjä mittauksia. Selkeällä säällä, kun tuuli on vähäistä ja taustakohina pientä, moduloituminen pysyy ± 1 Hz kaistalla. Tuulisissa olosuhteissa sinitaajuus moduloituu kuitenkin huomattavasti, jopa ± 10 Hz. Moduloituminen on myös verrannollinen taajuuteen, suuremmilla taajuuksilla signaali leviää enemmän kuin pienillä taajuuksilla. Esimerkkikuvassa 4.14 FFT:t on laskettu vastesignaalin koko sinisignaaliolosan ajalta (maksimaalinen resoluutio). Moduloitumisen tutkimisen jälkeen päädyttiin käyttämään 200 Hz kaistalla kaistanleveyttä 4 Hz. 1600 Hz taajuuskaistalla käytettävä taajuuskaista on 9,6 Hz, ja 40 Hz kaistalla 3,3 Hz. Kaistanleveyden kasvattaminen tapahtuu siis lineaarisesti taajuuteen nähden, kaavan (4.10) mukaisesti. Kaavassa b kuvaa käytettävää kaistanleveyttä ja f kyseistä taajuuskaistaa.

$$b = 4 \text{ Hz} + 0,004 * (200 \text{ Hz} - f) \quad (4.10)$$

Kun taas lasketaan taustakohinan tasoja ajan funktiona, sinitaajuuksien poistamisessa on tärkeää, että taustakohinalaskentaan ei tule mukaan komponentteja, jotka johtuvat herätteestä. Lähetettävät taajuudet poistetaan kaistanestosuotimella. Estokaistan on oltava niin leveä, että se kattaa kaikki taajuudet, jotka nostaisivat (virheellisesti) taustakohinatasoa esim. yli desibelillä. Sinitaajuuskaistat poistetaan tämän vuoksi leveämmillä kaistoilla vasteesta verrattuna sinitaajuuksien mukaan laskemiseen.



Kuva 4.14: Vasemmalla nähdään FFT selkeissä oloissa äänitetystä vasteesta. 200 Hz:n sinitaajuus on levinnyt n. 1 Hz. Oikealla on FFT tuulisissa oloissa äänitetystä vasteesta. 1000 Hz:n sinitaajuus on levinnyt yli 10 Hz.

Aika-taajuusresoluutio

Mitä pidemmälle signaalin osalle Fourier-muunnos lasketaan, sitä parempi taajuusresoluutio saadaan. Vastaavasti aikaresoluutio huononee. Aika-taajuusresoluutio noudattaa kaavaa (4.11).

$$\Delta f = \frac{1}{\Delta t}. \quad (4.11)$$

Kaava (4.11) ilmaisee, että halutun levyisen taajuuskaistan Δf erottaminen signaalista on kääntäen verrannollinen tarvittavan ajan Δt pituuteen. Mitä kapeampi kaista signaalista halutaan erottaa (esim. 10 Hz), sitä pidempi on valitun ajan oltava (1/10 s).

4.3.3 Tasolaskenta vaihe vaiheelta

Koko signaalin ajalta laskettu tehollisarvo

Signaalista otetaan ensin erikseen torvisignaaliolosuus ja bassosignaaliolosuus. Tämän jälkeen signaaleista suodatetaan kaistanpäästösuotimella esiin yksi sinitaajuus kerrallaan, ja suodatetulle signaalille lasketaan tehollisarvo. Kaistanpäästösuotimen leveys riippuu sinisignaalin taajuudesta, ks. 4.3.2.

Sinisignaalin tehollisarvo aikakehyksittäin

Myös aikakehyksittäin laskemisessa signaalista erotetaan ensin aikatasossa torvisignaaliolosuus ja bassosignaaliolosuus, ja suodatus tehdään samoin kuin edellisessäkin kohdassa. Suodatuksen jälkeen tasot lasketaan kuitenkin aikakehyksittäin. Aikakehyksen pituudeksi valittiin 0,5 s. Periaatteena aikakehyksen pituuden valinnassa oli, että ikkunan tulee olla pidempi kuin 0,2 s, jota lyhyemmällä äänillä ihmiskuulon herkkyys havaita tasoeroja heikkenee [6]. Toisaalta haluttiin kuitenkin kohtalainen aikaresoluutio, ja siten ikkunan maksimipituudeksi asetettiin 1 s. Sekuntia paremman aikaresoluution saamiseksi valittiin lopulta pituus 0,5 s. Myös käytetty kaistanpäästösuodatus vaikuttaa todelliseen aikaresoluutioon. Kun esimerkiksi kaistanleveydeksi valitaan 4 Hz (ks. 4.3.2), aikaresoluutio on $\frac{1}{4} \text{ s} = 0,25 \text{ s}$.

Kun tasoja lasketaan aikakehyksittäin, ikkunan päät hanning-ikkunoidaan ja ikkunat laiteetaan limittään, ks. 4.2.3. Hanning-ikkunointi pidentää todellista ikkunan pituutta, eli aikakehyksen pituudeksi tulee $0,5 \text{ s} + 2 * 0,05 \text{ s} = 0,6 \text{ s}$. Aikakehyksittäin ja sinitaajuuksittain lasketut tasojen arvot talletetaan tulostiedostoon, ja lisäksi tasojen keskiarvo ja hajonta talletetaan. Keskiarvoa verrataan koko signaalin ajalta laskettuun tehollisarvoon.

Taustakohinatason seuraaminen aikakehyksittäin

Myös taustakohinatason seuraamisessa signaalista otetaan käsittelyyn erikseen torvi- ja bassosignaaliolosuudet. Aluksi signaali suodatetaan suotimella, joka poistaa signaalista herätteen sinitaajuudet ja kaiutinten harmoniset komponentit ja keskeismodulaatiokomponentit. Tämän jälkeen tasot lasketaan terssikaistan leveydellä, yksi terssikaista kerrallaan, saman pituisilla aikakehyksillä kuin sinisignaalienkin tasot.

Käytettävä suodin pienentää terssikaistoittaisia taustakohinatason tasoja, koska osa kaistasta on vaimennettu. Vaimennetun osan määrä, ja siten myös vaimennus, vaihtelevat terssikaistoittain. Vaimennuksen suuruus eri terssikaistoille selvitetään kohinatestillä.

Testissä käytettiin valkoista kohinaa, josta kaistanpäästösuodatettiin kerrallaan yksi terssikaista. Tämän jälkeen tehtiin suodatus herätesignaali poistavalla suotimella. Jälkimmäisen suotimen vaimentava vaikutus laskettiin desibeleinä. Tulokset ovat nähtävissä kullekin terssikaistalle taulukossa 4.1.

4.3.4 Testiajot

Kuvassa 4.15 on esimerkki sinisignaalin tason ajallisesta vaihtelusta mittaussignaalin aikana. Kuva on 200 Hz:n kaistan tasoista. Vaihtelua on tässä tapauksessa vajaat kuusi desibeliä.

Taulukko 4.1: Taustakohinatason seuraamisessa käytettävän suotimen vaimennusvaikutus terssikaistoittain.

Terssikaistan keskitaajuus	Vaimennus terssikaistalla
40 Hz	2,8 dB
80 Hz	1,1 dB
160 Hz	0,4 dB
200 Hz	1,1 dB
250 Hz	0,8 dB
315 Hz	1,2 dB
400 Hz	3,1 dB
500 Hz	2,6 dB
630 Hz	4,2 dB
800 Hz	4,0 dB
1000 Hz	4,7 dB
1250 Hz	3,2 dB
1600 Hz	2,7 dB

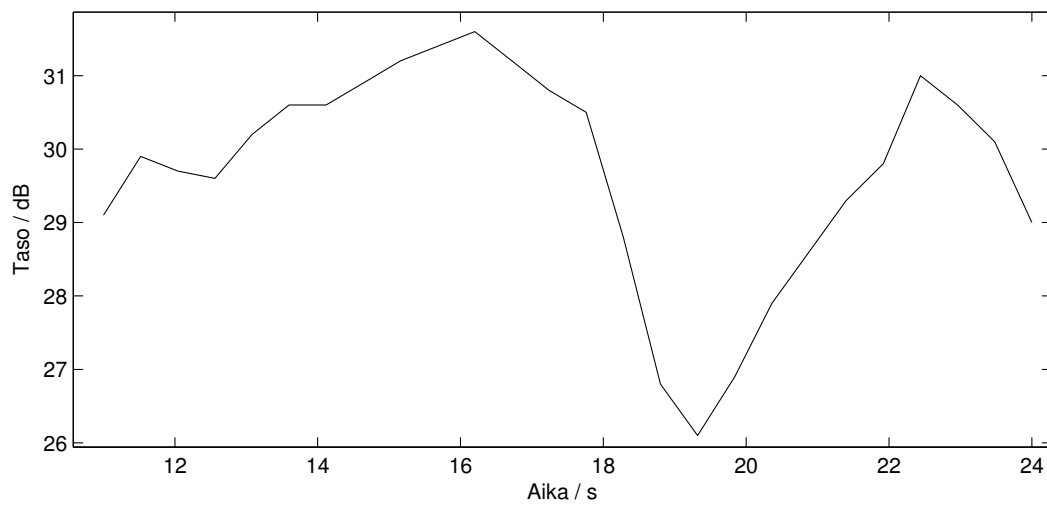
Analyysi ajettiin testiajona aineistolle, joka oli äänitetty aikavälillä 25.-31.10.2004. Kuvis-
sa 4.16–4.19 on esitettyä kuvaajat tuloksista kahdella eri taajuuskaistalla. Tasot on las-
kettu eri kuvissa eri levyisillä kaistoilla, sillä kaistanleveys muuttuu taajuuden funktiona.
Kaistanleveydet on mainittu kuvateksteissä. Lisäksi taustakohinan suodatus on aiheuttanut
taustakohinatasojen pienentymisen, joka on nähtävissä kullekin terssikaistalle taulukossa
4.1.

4.3.5 Matlab-koodin testaus

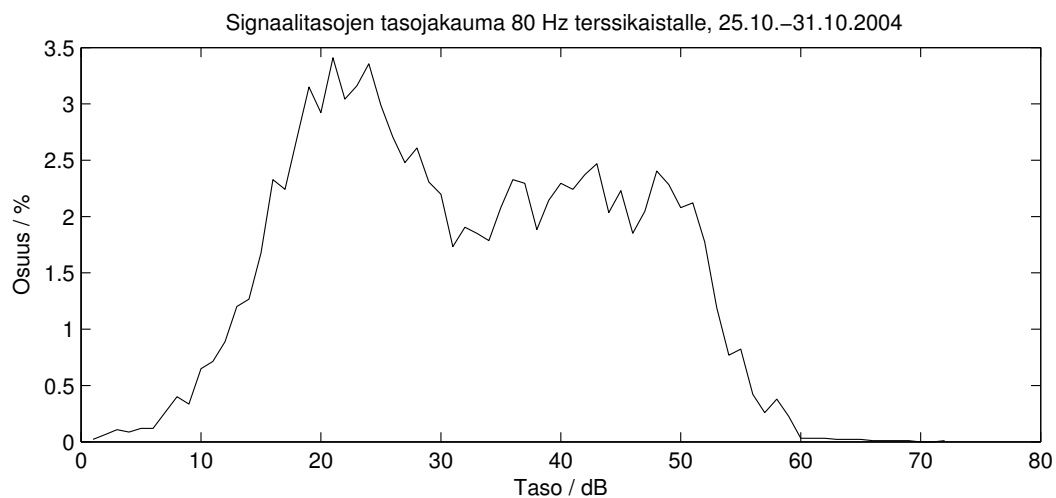
Tasolaskentaan liittyvän Matlab-koodin lopputestaus suoritettiin siten, että funktiolle an-
nettiin syötteenä heräte, jota viivästettiin 10 s etenemisviiveen aikaansaamiseksi. Herätteen
sinitaajuuksien tasot tunnetaan.

Kaikki koko signaalin ajalta lasketut tehollisarvot olivat oikeita. Eri taajuuksilla lasketut ta-
sot erosivat toisistaan yli 200 Hz taajuuksilla 0,002 dB ja alle 200 Hz taajuuksilla 0,001 dB.

Aikakehyksittäin laskettuna signaalitasot putosivat kullakin taajuudella 0,5 dB oikeasta ar-
vosta. Tämä tason pienentyminen johtui ikkunoinnista. Kun hanning-ikkunoinnin sijasta
siirryttiin käyttämään suorakulmaikkunointia, tasot erosivat koko signaalin ajalta lasketuis-
ta arvoista enää 0,02 dB.

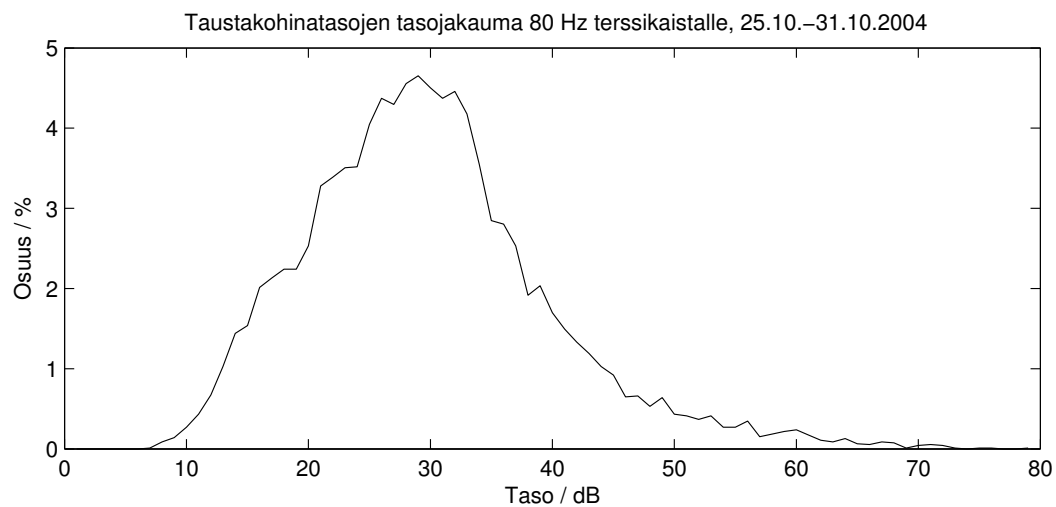


Kuva 4.15: Sinisignaalin tason vaihtelu yhden mittauksen sisällä. Vaihtelu on laskettu 200 Hz sinisignaalin, kaistana on ollut tällöin 198 Hz–202 Hz. Vaihtelu on laskettu 25.10.2004 klo 00 UTC tehdylle mittaukselle.

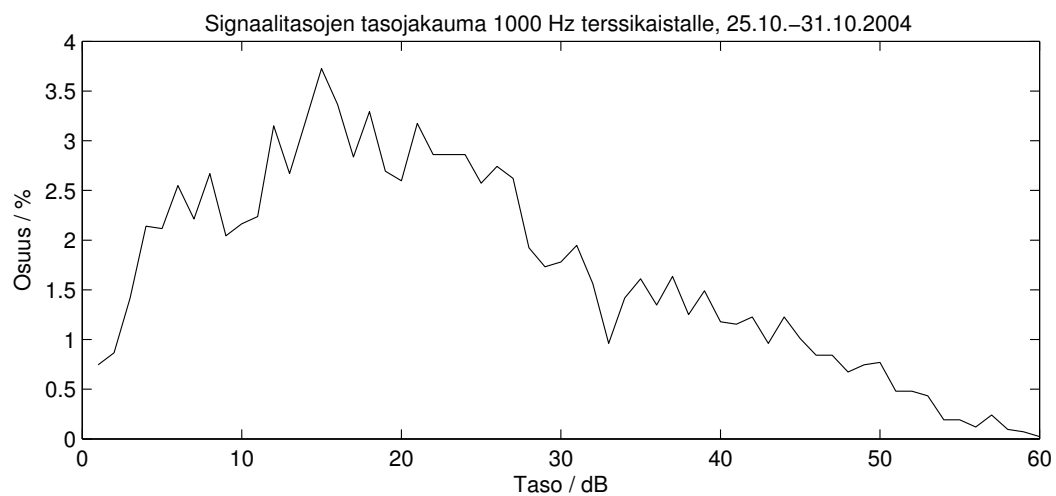


Kuva 4.16: Signaalitasot laskettuna 80 Hz sinitaajuudelle. Tasot laskettiin kaistalle 78,2 Hz–81,7 Hz. Osuudet on laskettu yhden desibelin välein.

Testiajossa torvikaiuttimen sinitaajuuksien tasoarvot vaihtelivat ajan funktiona alle 0,003 dB. Bassokaiuttimen sinitaajuuksille tasoerot ajan funktiona olivat 0,001 dB. Tasojen hajonta vaihteli sinitaajuudesta riippuen 0,008 dB ja 0,018 dB välillä.



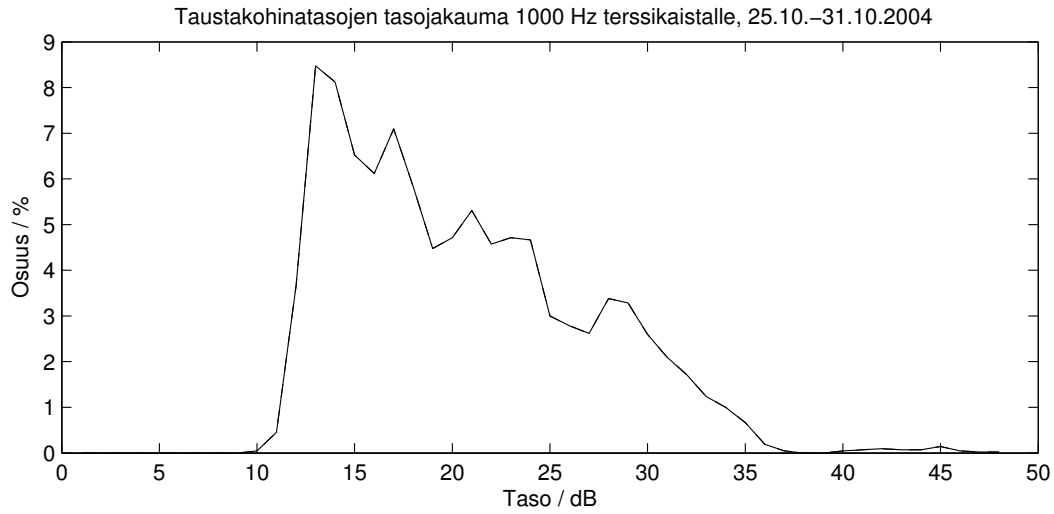
Kuva 4.17: Taustakohinatasot laskettuna 80 Hz terssikaistalle (70,8 Hz–89,1 Hz). Osuudet on laskettu yhden desibelin välein.



Kuva 4.18: Signaalitasot laskettuna 1000 Hz sinitaajuudelle. Tasot laskettiin kaistalle 996,3 Hz–1003,7 Hz. Osuudet on laskettu yhden desibelin välein.

4.4 Etenemisviiveanalyysi

Etenemisviive selvitetään, jotta saadaan selville äänen nopeuden vaihtelut eri sääolosuhteissa. Käytetyllä tekniikalla voitaisiin selvittää myös monitie-etenemistä (heijastukset esim. inversiokerroksesta), mutta käytettävän ajan puitteissa monitie-eteneminen jätettiin jatko-



Kuva 4.19: Taustakohinatasot laskettuna 1000 Hz terssikaistalle (891,3 Hz–1122 Hz). Osuudet on laskettu yhden desibelin välein.

tutkimuksen aiheeksi. Viive olisi haluttu selvittää erikseen eri terssikaistoille, mutta tähän ei päästy (tarkemmin myöhemmin tässä luvussa). Siksi viive selvitetään kaistalle 200 Hz–1000 Hz.

Etenemisviiveen selvittämisessä on kyse aikaviivearvioinnista³. Ongelma on tuttu käytettävän mittausjärjestelmän lisäksi mm. monisensorisista vastaanottimista ja stereonäkölaitteista. Aikaviivearvioinnissa käytettävissä ovat signaalit x_1 ja x_2 (4.12), (4.13) [4]. Signaalia x_1 voidaan sanoa myös referenssisignaaliksi. Tässä tapauksessa x_1 on sama kuin lähetettävä signaali $s(t)$. Signaali x_2 taas on tässä tapauksessa vastaanotettu signaali. Signaali on skaalautunut vakiolla A ja viivästynyt parametrin D verran. Lisäksi signaaliin on sekoittunut kohinaa n_2 .

$$x_1(t) = s(t) \quad (4.12)$$

$$x_2(t) = As(t - D) + n_2(t) \quad (4.13)$$

Perinteinen tapa selvittää aikaviivearvioita on ristikorraation käyttäminen signaalien x_1 ja x_2 välillä. Ristikorrelaatiosta voidaan selvittää maksimi ja näin saada selville viive D . Ristikorrelaatio vaatii paljon laskentaa verrattuna moniin muihin tekniikoihin, mutta sitä on pitkään pidetty parhaan tuloksen antavana menetelmänä. Ristikorrelaatio on kuvattu tarkem-

³Time Delay Estimation, TDE

min luvussa 4.4.3. Muita tekniikoita ovat esimerkiksi polariteetti-koincidenssimenetelmä⁴ tai keskiarvoistava magnitudin differenssifunktio⁵ [4],[16].

Työssä kokeiltiin useita menetelmiä. Ensimmäinen menetelmä on yksinkertainen ja perustuu äänitehotason seuraamiseen ajan funktiona (luvussa 4.4.1). Toinen menetelmä on parannus tästä, koska ensimmäisellä menetelmällä ei saavutettu riittävän tarkkoja tuloksia (luvussa 4.4.2). Kolmas menetelmä kehitettiin, koska aiemmat menetelmät eivät osoittautuneet luotettaviksi ja koska ne eivät toimineet suurimmalle osalle vasteita. Syy huonoon toimivuuteen oli, että suurimmassa osassa vasteita taso vaihteli huomattavasti alunperin ajateltua enemmän ja tästä aiheutui ongelmia. Kolmannessa menetelmässä viive lasketaan kaistalle 200–1000 Hz. Menetelmä pohjaa edellä mainittuun aikaviivearvion selvittämiseen. Valittu menetelmä perustuu sinipyyhkäisujen ja ristikorrelaation käyttöön ja on kuvattu luvussa 4.4.3.

Etenemisviiveen laskenta perustuu oletukseen, jonka mukaan lähetys- ja vastaanottopalvelinten kellot käyvät samaa aikaa ja tarkat lähetys- ja vastaanottohetket tiedetään. Aikasyntonian saavuttaminen on kuvattu luvussa 3.3.

4.4.1 Tason nousuhetki

Analyysin ensimmäisessä versiossa vasteesta lasketaan aluksi kullekin lähetetylle sinisignaali äänitehotaso. Tämän jälkeen vasteesta kaistanpäästösuodatetaan yksi sinisignaali kerrallaan, ja katsotaan noin 10 ms aikakehyksittäin, milloin signaalin teho saavuttaa kyseiselle terssikaistalle lasketun tason. Tätä hetkeä pidetään signaalin saapumishetkenä. Menetelmä ei ota kovin hyvin huomioon sitä, että signaalin taso vaihtelee mittauksen aikana ja sinisignaalin alun taso voi olla pitkään keskiarvoa matalampi.

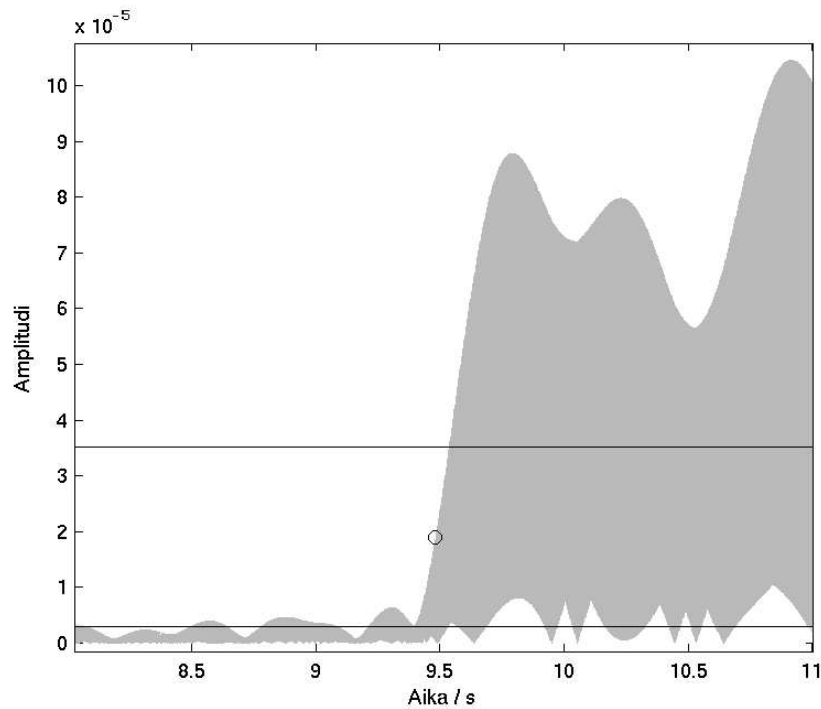
Parannuksena päätettiin verrata vastesignaalin alun taustakohinatasoa ja signaalitasoa toisiinsa, ja määrittää signaali alkaneeksi silloin, kun signaalin taso saavuttaa taustakohinatasoa ja signaalitason puolivälin. Kuvassa 4.20 on esitetty tämän menetelmän soveltaminen signaaliin, jossa on hyvä signaali-kohinasuhde. Kuvassa on piirrettynä signaalin itseisarvo sekä vaakaviivoilla signaalin ja kohinan keskimääräiset amplitudit. Signaali katsotaan alkaneeksi, kun signaali ohittaa viivojen puolivälin pisteen (kuvassa ympyrä).

Menetelmä toimii suoraan, jos tapaus on stabiili eikä taso vaihtelee signaalin aikana. Todellisuudessa taustakohinan taso vaihtelee ja menetelmä on altis häiriöille. Aluke voi myös olla joko loiva tai terävä, joten aikaresoluutiosta ei saada kovin hyvää. Lisäksi aikaresoluutiota huonontaa käytettävä kaistanpäästösuodatus. Kun kaistaksi valitaan esim. 4 Hz, aika-

⁴Polarity coincidence correlation

⁵AMDF, Averaged Magnitude Difference Function

resoluutioksi saadaan enää $\frac{1}{4} \text{ s} = 0,25 \text{ s}$. Niinpä alkuhetkeä ei saada tällä menetelmällä luotettavasti.



Kuva 4.20: Kun signaali-kohinasuhde on hyvä, signaalin alkuhetki voidaan selvittää vertaamalla signaalin ja kohinan tehoja. Ylempi vaakaviiva kuvaa signaalin itseisarvon keskimääräistä amplitudia aikavälillä 11 s–21 s. Alempi vaakaviiva vastaavasti kohinan itseisarvon keskimääräistä amplitudia aikavälillä 1 s–8 s. Ympyrä kuvaa signaalin määritettyä alkamishetkeä.

4.4.2 Hilbert-verhokäyrä ja sigmoid-funktio

Toisen menetelmän tarkoituksena oli parantaa edellisen menetelmän tarkkuutta ja luotettavuutta.

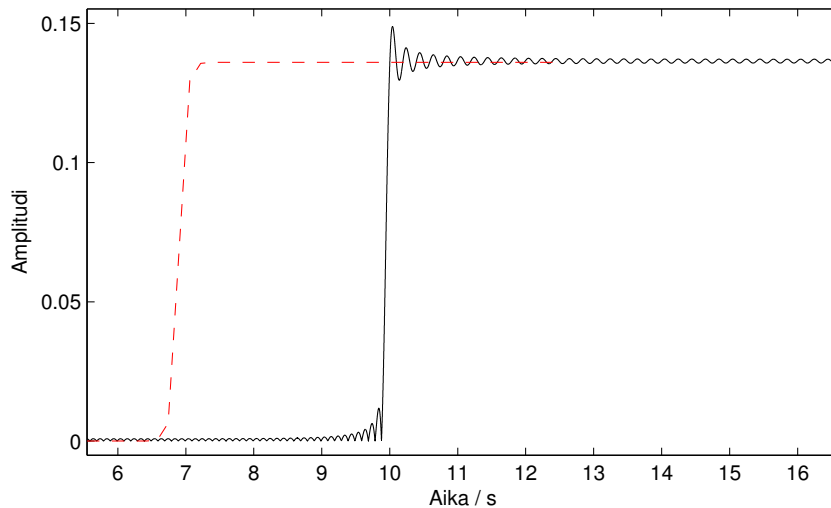
Vastesignaaliin lasketaan suodatuksen jälkeen Hilbert-verhokäyrä. Hilbert-verhokäyrän laskeminen tarkoittaa, että signaaliin lasketaan Hilbert-muunnos, josta otetaan itseisarvo. Hilbert-muunnoksessa reaaliin signaaliin lisätään imaginaariosa, ja muunnos on esitetty kaavassa (4.14) [9]. Hilbert-verhokäyrän etuja pelkkään itseisarvoon verrattuna on, että käyrä käyttäytyy rauhallisemmin. Kaavassa x on alkuperäinen signaali ja z Hilbert-muunnettu

signaali.

$$z(t) = x(t) + j \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (4.14)$$

Kuvassa 4.21 on Hilbert-verhokäyrä herätteen yhdelle sinitaajuudelle. Verhokäyrään sovitetaan sigmoid-muotoista funktiota (katkoviivalla piirretty käyrä kuvassa 4.21). Funktio toteuttaa yhtälön 4.15. Sigmoid-funktiota käyttämällä saapumisajanhetki saadaan selvitettyä luotettavammin kuin vain nousuhetkeä tarkastelemalla. Kuvasta nähdään, että signaalin alkuhetki pystytään ratkaisemaan sigmoid-käyrästä hyvinkin tarkkaan.

$$y = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}} \quad (4.15)$$

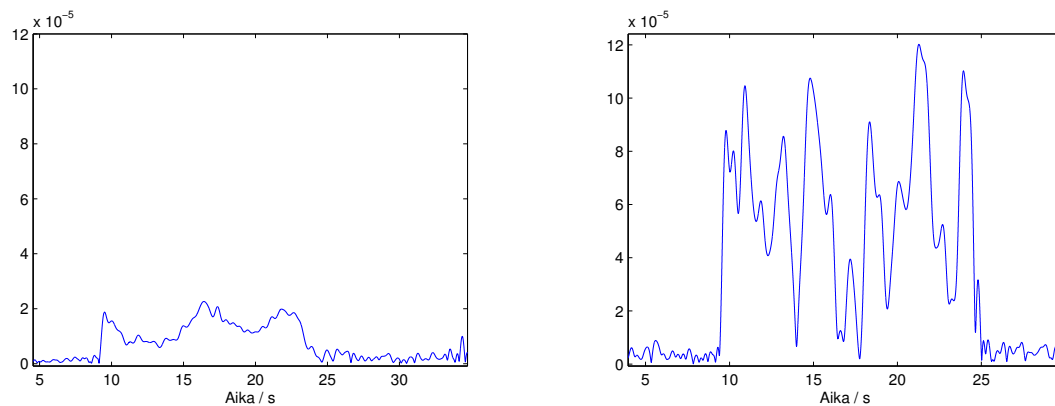


Kuva 4.21: Yhtenäinen käyrä kuvaa herätteen alkuhetkeä, kun herätteestä on kaistanpäästösuodatettu 400 Hz:n kaista, ja suodatetulle signaalille on laskettu Hilbert-verhokäyrä. Katkoviivalla piirretty käyrä on sigmoid-funktion muoto. Mittausdataan sovitettua sigmoid-funktiota voidaan käyttää alkuhetken etsimiseen.

Todelliset tapaukset ovat kuitenkin kaukana herätteen kaltaisista "siisteistä" tapauksista. Useimmiten taso vaihtelee sinisignaalin aikana huomattavasti, jopa 10–20 dB. Kuten edellisessäkin menetelmässä, tässäkin tapauksessa kaistanpäästösuodatus heikentää aikaresoluutiota huomattavasti.

Kuvassa 4.22 on sekä ei-tuulisissa (tuulen nopeus alle 1 m/s) että tuulisissa oloissa (tuulen nopeus 4 m/s) mitatut vasteet, joille on laskettu Hilbert-verhokäyrä. Kuvasta nähdään, että

ei-tuulisissa oloissa taso vaihtelee kohtalaisen vähän. Sen sijaan tuulisissa oloissa mitatun vasteen taso vaihtelee huomattavasti ajan funktiona. Tästä aiheutuu ongelmaksi oikeiden parametrien löytäminen sigmoid-funktiolle luotettavasti, jotta voidaan paikantaa todellinen alkuajanhetki eikä hetkellistä häiriötä.



Kuva 4.22: Vasemmalla on ei-tuulisissa olosuhteissa mitatun vasteen Hilbert-käyrä. Vasteen taso pysyy suhteellisen vakiona kaiken aikaa. Oikealla on vastaava käyrä tuulisissa olosuhteissa mitatulle vasteelle. Taso vaihtelee huomattavasti ajan funktiona.

Menetelmiä kokeiltaessa todettujen ongelmien vuoksi kumpaakaan edellä kuvatuista menetelmistä ei otettu käyttöön etenemisviiveen määrittämisessä.

4.4.3 Sinipyyhkäisyjen ristikorrelaatio

Etenemisviiveanalyysissä käyttöön otettu menetelmä perustuu sinipyyhkäisyjen ja ristikorrelaation käyttöön. Analyysissä otettiin vertailuun herätteen yksi sinipyyhkäisy ja vasteen koko sinipyyhkäisyjakso. Luotettavuusparametreinä käytetään signaali-kohinasuhdetta sekä kolmen viivearvion hajontaa. Huono puoli on, että etenemisviivettä ei saada laskettua eri taajuuskaistoille erikseen.

Ristikorrelaatio

Etenemisviiveanalyysissä käytetään ristikorrelaatiota. Ajatus ristikorrelaatiossa on, että siinä analysoidaan kahden signaalin keskinäistä samankaltaisuutta [4]. Ristikorrelaation laskenta diskreeteille signaaleille tapahtuu kaavan (4.16) [4] mukaisesti. Kaavassa x ja y ovat aikataso signaaleja, joille ristikorrelaatio lasketaan.

$$r_{xy}(k) = \sum_{i=0}^{N-1} x(i)y(i+k) \quad (4.16)$$

Ristikorrelaatiota hyödynnetään analyysissä siksi, että laskemalla ristikorrelaatio herätteen ja vasteen välillä, voidaan samankaltaisuudet saada esiin vielä melko häiriöisessä tapauksessa. Tämä johtuu siitä, että ympäristön häiriöt, kuten tuulikohina, eivät ole koherentteja herätteen kanssa.

Analyysissä lasketaan ristikorrelaatio herätteen yhden sinipyhköisyn ja vasteen koko sinipyhköisyjakson kanssa. Ideaalisessa tapauksessa laskettu ristikorrelaatiofunktio koostuisi pelkästään kolmesta yhtäsuuresta piikistä. Todellisuudessa ristikorrelaation suuruus vaihtelee, ja ristikorrelaatiopiikeissä on "häntää". Tämä johtuu käytännössä jälkikaiunnasta.

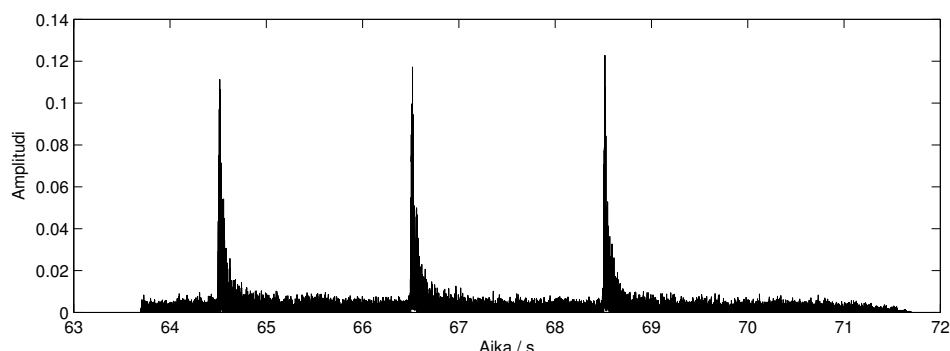
Menetelmän kehittäminen

Herätteessä käytettiin kesä-elokuussa 2004 kolmea peräkkäistä sinipyhköisyyä, joissa taajuus nousi lineaarisesti taajuudesta 200 Hz 1000 hertsiin. Yhden pyhköisyn kesto oli 0,3 s. Elokuun lopussa pyhköisyä parannettiin parempien tulosten saavuttamiseksi. Tällöin kunkin pyhköisyn kesto pidennettiin 1,0 sekuntiin ja pyhköisujen välille jätettiin sekunnin tauko. Taajuusalue pidettiin muuttumattomana. Tauon tarkoituksena oli päästä eroon luonnon aiheuttaman jälkikaiun haittavaikutuksista, eli jälkikaiun leviämisestä jälkimmäisiin sinipyhköisyjaksoihin. Tässä onnistuttiinkin, ja hitaampi pyhköisy antoi ylipäättään luotettavampia tuloksia kuin aiemmat nopeat. Muutoksen vuoksi analyysijä tehtiin kuitenkin kaksi erilaista, joista alla on ensin kuvattu etenemisviiveen selvittäminen pidemmistä sinipyhköisyyistä.

Etenemisviiveelle laskettiin estimaatti kaavalla $\frac{3240 \text{ m}}{334 \text{ m/s}} = 9,7 \text{ s}$. Etenemisviive vaihtelee noin sekunnin verran. Siten saatiin arvioitua, että etenemisviive pysyy välillä 9,2 s–10,2 s. Vasteen sinipyhköisyjakso valittiin niin, että kaikki sinipyhköisy kuuluvat jaksoon, vaikka etenemisviive vaihtelisikin edellä määritetyissä rajoissa.

Analyysin alussa vasteesta kaistanpäästösuodatetaan esille kaista 200 Hz–1000 Hz. Tämän jälkeen lasketaan ristikorrelaatio herätteen yhden sinipyhköisyn ja vasteen ed. kappaleessa määritetyn sinipyhköisyjakson välillä. Esimerkki tällaisen ristikorrelaation itseisarvosta on kuvassa 4.23.

Ristikorrelaation itseisarvosta otetaan käsittelyyn se jakso, johon tiedetään ensimmäisen pyhköisyn osuvan, samalla niin, että muut pyhköisyt eivät osu jaksoon. Tälle jaksolle lasketaan Hilbert-verhokäyrä, ja käyrää tasoitetaan alipäästösuodattamalla. Verhokäyrän alipäästösuodatuksella pyritään kohinaisessa tapauksessa pääsemään eroon yksittäisistä



Kuva 4.23: Esimerkki viiveanalyysin ristikorrelaation itseisarvosta.

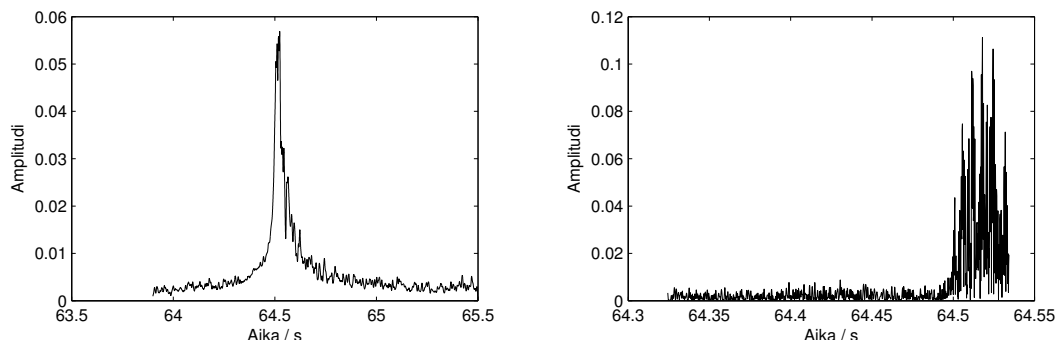
kohinapiikeistä, jotka voisivat vääristää tuloksen. Alipäästösuodatus tehdään toisen asteen Butterworth-suotimella. Suodatus tehdään sekä eteen- että taaksepäin, jotta suodatuksesta saadaan lineaarivaiheinen. Lisäksi suodatuksesta tarkastettiin impulssiherätteellä, että suodatus ei tuo viivettä signaaliin. Esimerkki yhdestä tällaisesta Hilbert-verhokäyrästä on kuvassa 4.24.

Suodatetusta verhokäyrästä etsitään maksimiarvo, eli oikeammin ajanhetki, jolloin verhokäyrän arvo on maksimissaan. Tämä maksimi tarkoittaa sitä kohtaa, jossa herätteen ja vastteen samankaltaisuus on maksimissaan. Maksimi sen sijaan ei todennäköisesti tarkoita sitä hetkeä, jolloin suora ääni on saapunut vastaanotto paikalle, sillä kyse voi olla esimerkiksi voimakkaasta ja vähän moduloituneesta heijastuksesta.

Maksimin löytämisen jälkeen ollaan saatu selville karkea arvio saapumishetkestä. Arvioitun hetken (t_a) ympäriltä valitaan aikajakso (esim. $[t_a - 0,2 \text{ (s)}, t_a + 0,010 \text{ (s)}]$), johon todellinen suoran äänen saapumishetki kuuluu. Tämän jälkeen tarkastellaan ristikorrelaation itseisarvoa kyseiselle aikavälille. Suodattamattoman ristikorrelaation itseisarvosta valitaan muutama korkein huippu (esim. 20 huippua), joista ajanhetkeltään ensimmäinen päätetään signaalin saapumisajaksi. Kuvassa 4.24 on nähtävissä esimerkki valitusta ristikorrelaation aika-alueesta.

Hilbert-verhokäyrän laskenta, maksimin etsiminen ja tämän jälkeen saapumisajan etsiminen tehdään erikseen kaikille kolmelle sinipyyhkäisylle. Näin saadaan kolme arviota saapumishetkeksi. Koska pyyhkäisyjen välinen aikaero on kaksi sekuntia, lasketaan hajonta tämän aikaeron sekä selvitettyjen saapumishetkien välisten aikaerojen välillä. Hajonnan arvoa käytetään toisena kahdesta luotettavuusparametrin.

Toisena tuloksen luotettavuusparametrinä käytetään signaali-kohinasuhdetta. Signaali-kohinasuhde lasketaan tässä tapauksessa vertaamalla Hilbert-verhokäyrän maksimiarvoa ja



Kuva 4.24: Vasemmalla on esitettyä esimerkki Hilbert-verhokäyrästä, joka on laskettu ristikorrelaation yhdelle sinipyyhkäisylle. Verhokäyrää on myös tasoitettu alipäästösuodattamalla. Oikealla on zoomattu vastaavan sinipyyhkäisyn ristikorrelaation alku. Tästä ristikorrelaatiosta päätetään signaalin saapumisaikaa.

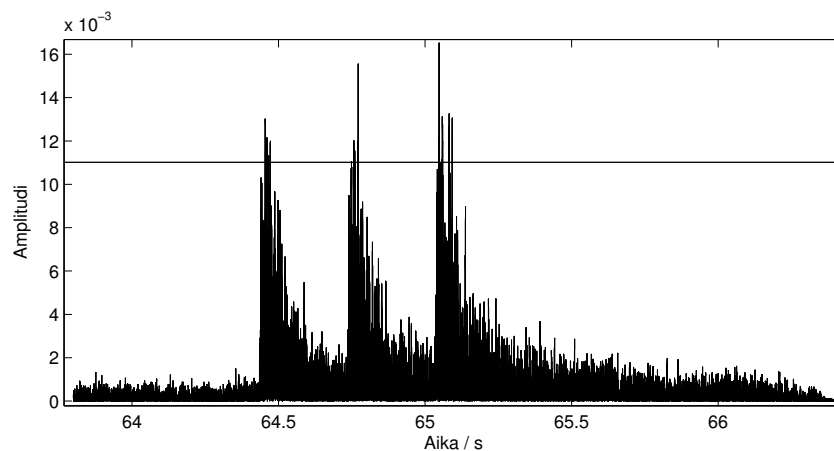
ristikorrelaation itseisarvon ennen sinipyyhkäisyä olevan jakson (taustakohinajakson) keskiarvoa toisiinsa.

Lyhyempien sinipyyhkäisyjen analysoiminen on hankalampaa, koska kaikki pyyhkäisy mahtuvat 0,9 s aikajakson sisälle. Siten yksittäisiä huippuja on vaikeampaa löytää. Niinpä analyysi toteutetaan suoraviivaisemmin, mutta samalla vähemmän luotettavasti. Analyysi ei annakaan lainkaan tulosta, mikäli ristikorrelaatio on osoittautunut liian kohinaiseksi.

Lyhyempien sinipyyhkäisyjen tapauksessa ensin signaalista suodatetaan kaistanpäästösuo-
timella kaista 200 Hz–1000 Hz, kuten edellisessäkin tapauksessa. Tämän jälkeen lasketaan
herätteen yhden sinipyyhkäisyn ja vasteen sinipyyhkäisyjakson välillä ristikorrelaatio. Ku-
vassa 4.25 on esimerkki ristikorrelaatiosta.

Kokeilemalla tultiin siihen tulokseen, että kaikki saapumishetket mahtuvat n. sadan kor-
keimman ristikorrelaatiopiikin joukkoon. Nämä ovat kuvassa 4.25 mustan viivan yläpuo-
liset arvot. Näiden valittujen piikkien aikaindeksit laitetaan järjestykseen, ja ensimmäinen
piikki tulkitaan ensimmäisen sinipyyhkäisyn alkamishetkeksi. Mikäli ristikorrelaatiosta on
kolme selvää piikkirykelmää (kolmen sinipyyhkäisyn saapumishetket), saadaan toisen sini-
pyyhkäisyn saapumishetki siirtymällä indekseissä ensimmäisestä saapumishetkestä 0,15 s
verran eteenpäin ja ottamalla sitten seuraava korkean piikin indeksi. Tällä tavoin jatketaan
indeksien loppuun asti, jotta tiedetään, oliko rykelmiä enemmän kuin kolme.

Näin on saatu sinipyyhkäisyjen alkamishetket, jotka muutetaan ristikorrelaation indekseistä
etenemisviiveeksi sekunteina. Eri pyyhkäisyistä saaduista etenemisviiveistä lasketaan kes-
kiarvo ja pyyhkäisyjen välisistä ajoista hajonta, aivan kuten 1 s sinipyyhkäisyjenkin tapauk-



Kuva 4.25: Esimerkki vasteen sinipyyhkäisyosuuden ja herätteen yhden sinipyyhkäisyyn välillä lasketusta ristikorraatiosta. Vaakaviivan yläpuoliset arvot otetaan mukaan, kun valitaan pyyhkäisyjen alkamishetkiä.

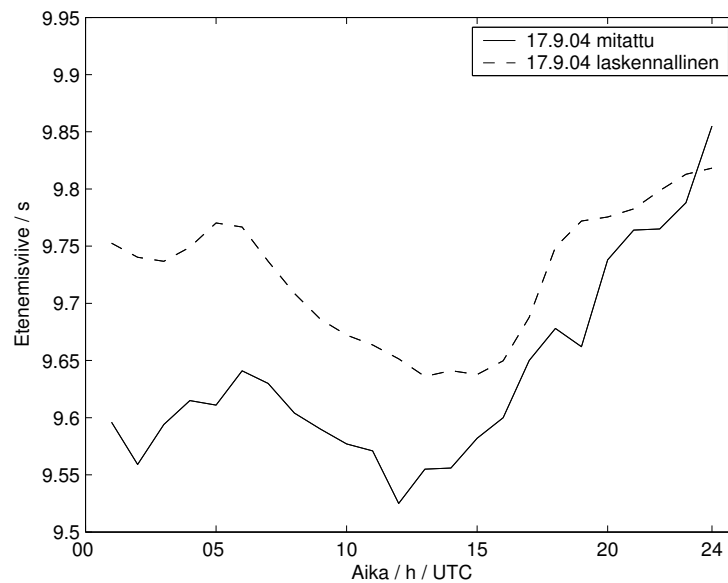
sessä.

Mikäli ristikorraatiossa ei ole kolmea selvää piikkirykelmää, signaalikohinasuhde on liian huono ja korkeat piikit sijoittuvat tasaisesti ristikorraation ajalle. Tällöin saadaan tulokseksi liian monta saapumishetkeä ja tulos hylätään suoraan. Muuten tulosten hyväksyminen tai hylkääminen jätetään tulosten mallintajan päätettäväksi.

Testiajot

Kuvassa 4.26 on esitetty esimerkkikotos tuloksista. Kuvassa on laskettu etenemisviive yhden vuorokauden ajalle tunnin välein tehdyistä mittauksista. Arvot on laskettu soveltamalla ensimmäistä ristikorraatiotekniikkaa, eli kyse on 1,0 s sinipyyhkäisyistä. Kuvassa oleva laskennallinen etenemisviive on laskettu käyttämällä hyväksi lämpötilahavaintoja ja kaavaa (2.3). Käyrät eivät ole täsmälleen samanlaiset, koska myös muut säätökijät kuin lämpötila vaikuttavat etenemisviiveeseen. Lisäksi äänen etenemisviiveen estimointi kaavalla (2.3) on epätarkkaa, koska arvot lasketaan nopeuden yhden desimaalin tarkkuudella. Lämpötilahavainnot ovat myös yhden tunnin keskiarvoja lämpötilasta sääasemalla, kun taas mittaus on tehty aina tietyllä minuutilla.

Analyysille suoritettiin myös etenemisviiveiden testiajo aikavälille 25-31.10.2004. Kyseisellä aikavälillä äänitteiden signaalikohinasuhde vaihteli yli 10 dB, joskus pyyhkäisyä jäivät kokonaan kuulumatta äänitteessä, toisinaan pyyhkäisyä kuuluivat selkein vastaanottopai-



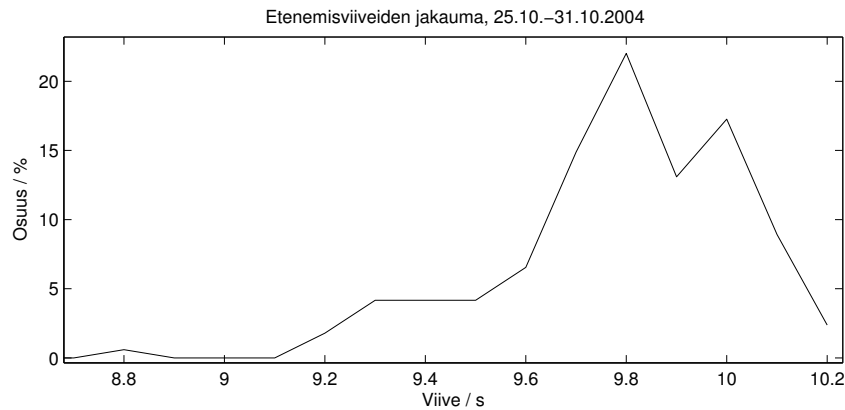
Kuva 4.26: Esimerkki etenemisviiveanalyysin tuloksista yhden vuorokauden aikana. Arvot on laskettu käyttämällä 1,0 s sinipyhkyäisyjen menetelmää. Katkoviivalla merkitty käyrä kuvaa laskennallista etenemisviivettä, kun sääoloista ainoastaan lämpötilan vaikutus otetaan huomioon. Vaikutus on laskettu käyttäen kaavaa (2.3).

kalle.

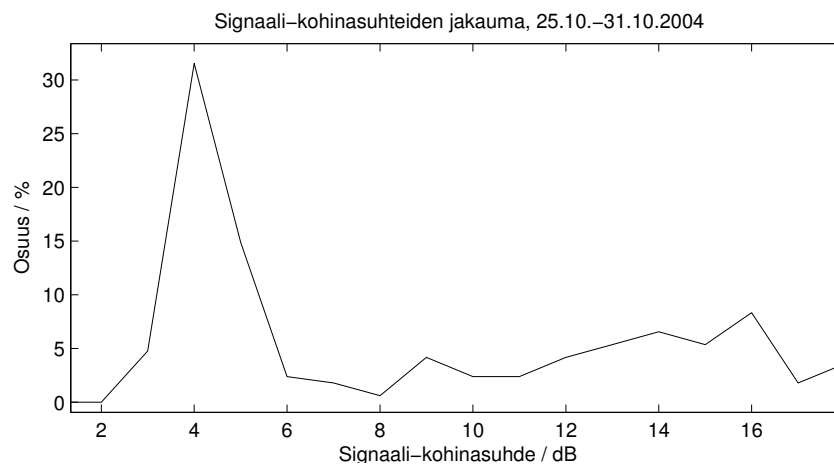
Kuvissa 4.27 – 4.29 on esitetty testiajon ajanjaksolle selvitettyjen etenemisviiveiden jakauma, signaali-kohinasuhteiden jakauma sekä tuloshajontojen jakauma. Tuloksissa hajonta siis tarkoittaa yhden äänitteen sisällä eri sinipyhkyäisyjen viiveiden hajontaa. Kun signaali-kohinasuhde oli huono, vastaavasti hajonta oli suuri ja päinvastoin.

Matlab-koodin testaus

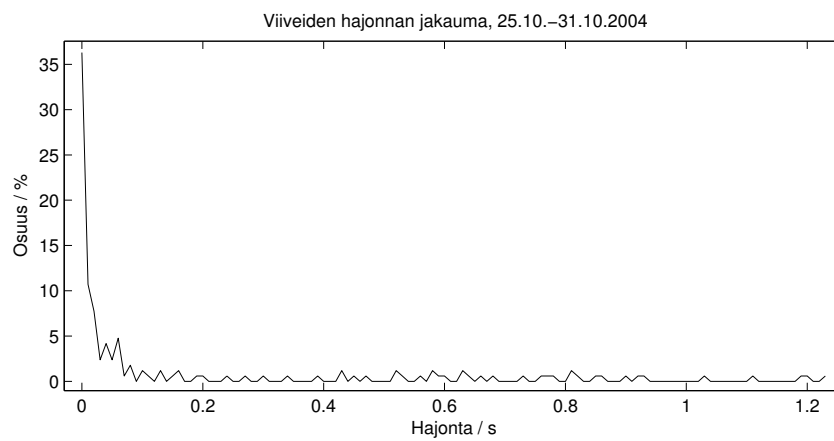
Matlab-koodi testattiin syöttämällä funktioon heräte, jota oli viivästetty 10 s verran etenemisviiveen aikaansaamiseksi. Ohjelmisto antoi vastauksena 2 ms liian aikaisen saapumissajan. Tämä johtuu siitä, että menetelmä olettaa signaalin ristikorrelaatioissa olevan useita piikkejä. Herätteessä ristikorrelaatiopiikkejä on vain sinipyhkyäisyjen lukumäärän verran.



Kuva 4.27: Viiveiden jakauma yhden viikon ajanjaksolla. Osuudet on laskettu sekunnin kymmenesosan välein.



Kuva 4.28: Viiveanalyysin signaali-kohinasuhteiden jakauma yhden viikon ajanjaksolla. Osuudet on laskettu yhden desibelin välein. Jakaumasta nähdään, että signaali-kohinasuhteet ovat painottuneet 4 dB kohdalle. Tämä signaali-kohinasuhde ei aina riitä luotettavan tuloksen saamiseen. Toisaalta yli kymmenen desibelin signaali-kohinasuhteilla tulos on jo hyvinkin luotettava.



Kuva 4.29: Hajontojen jakauma yhden viikon ajanjaksolla. Kun hajonta on yli 0,05 s, tulos on epäluotettava. Yleensä epäluotettavuus johtuu liian huonosta signaali-kohinasuhteesta. Pieni hajonta kertoo, että tulos on luotettava. Jakauma on laskettu sekunnin sadasosan välein.

4.5 Suunta-analyysi

Suunta-analyysin tarkoituksena on selvittää äänen monitie-etenemistä eri sääolosuhteissa. Suunta-analyysissä selvitetään äänen tulosuunta mikrofoniantenniin nähden sekä pysty- että vaakasuunnassa. Suunta-analyysi perustuu sinipyyhkäisyjen ja ristikorrrelaation käyttöön.

4.5.1 Ristikorrrelaatio suoraan eri mikrofoniin välisistä vasteista

Ensimmäinen kokeilu tehtiin vierekkäisten kanavien sinipyyhkäisyvasteiden ristikorrrelaationa. Mikrofoneista valittiin ne, jotka olivat kauimpana toisistaan kohtisuorassa suoran äänen kulkusuuntaan nähden. Etäisyys mikrofoniin välillä oli 1,75 m. Valituista vasteista otettiin tarkasteluun sinipyyhkäisyosuudet. Osuudet tuli ottaa riittävän pitkinä, koska sinipyyhkäisyjen tarkkaa saapumisaikaa ei tiedetty.

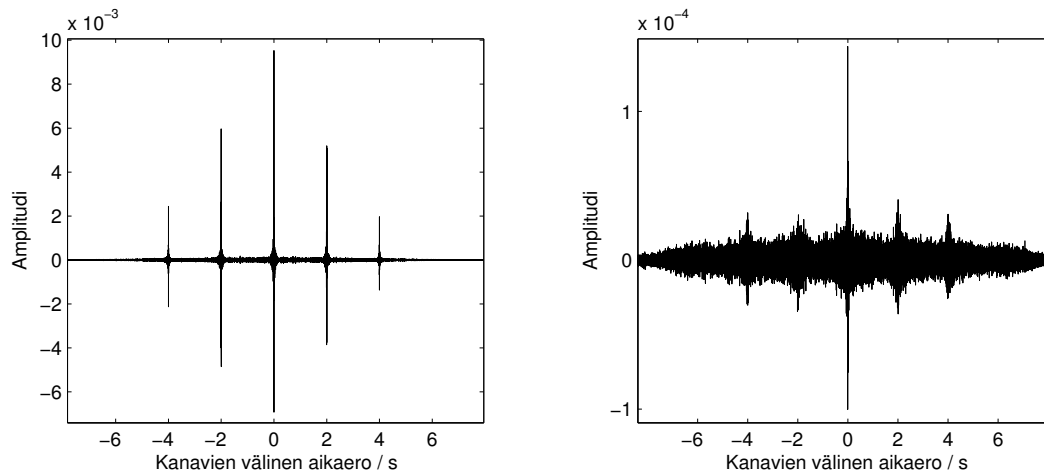
Ennen ristikorrrelaation laskemista signaaleista suodatettiin kaistanpäästösuotimella esille kaista 200-1000 Hz (sinipyyhkäisy kaista). Näin päästiin eroon erityisesti pienitaajuuksista häiriöistä.

Aluksi kokeiltiin yksinkertaisesti kahden mikrofoni antennissa vierekkäin olevan mikrofoniin vasteiden sinipyyhkäisylle, mihin kohtaan ristikorrrelaation maksimi asettuu, ja ristikorrrelatiomaksimi muutettiin aste-eroksi kanavien välillä. Menetelmä toimii useissa tapauksissa hyvin, mutta on altis häiriöille. Esimerkiksi läheisellä tiellä juuri pyyhkäisy aikana kulkeva auto aiheuttaa ristikorrrelaatioon sen, että ääni vaikuttaisi tulevan suoraan sivulta. Kuvassa 4.30 on nähtävissä sekä häiriötön että auton häiritsemä ristikorrrelaatio.

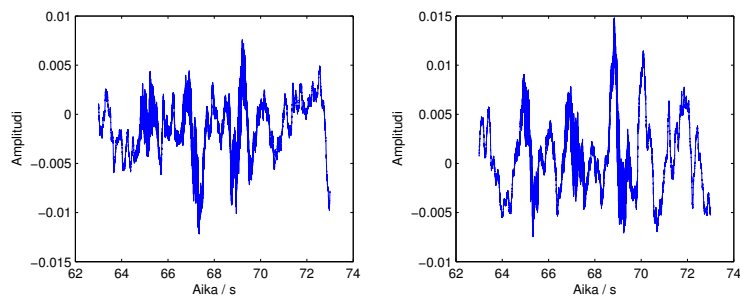
4.5.2 Ristikorrrelaatioiden ristikorrrelaatio

Menetelmää parannettiin, jotta erilaisten häiriöiden vaikutus saataisiin poistettua. Mallia otettiin etenemisviiveanalyysistä.

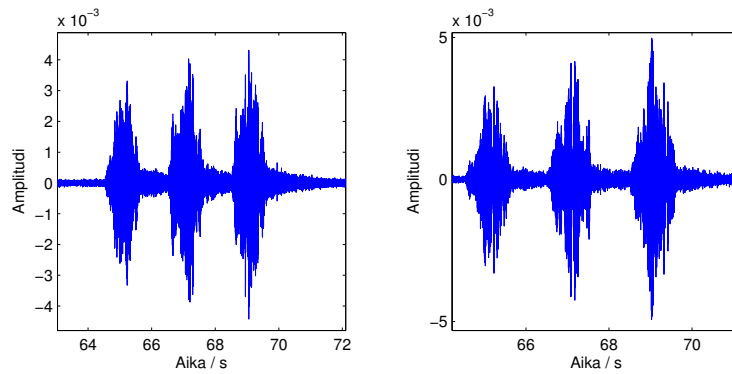
Kanavien sinipyyhkäisyosuuksille laskettiin ensin ristikorrrelaatio herätteen yhden sinipyyhkäisyyn kanssa. Näin päästiin käsiksi vasteen todelliseen pyyhkäisyosuuteen ja ulkopuoliset häiriöt saatiin poistetuksi. Tämän jälkeen laskettiin saatujen ristikorrrelaatioiden välinen ristikorrrelaatio. Paremman tarkkuuden saamiseksi ristikorrrelaatiofunktiota interpoloitiin. Menetelmä osoittautui edeltäjäänsä luotettavammaksi. Suunta-analyysin kaikki neljä vaihetta on kuvattuna kuvissa 4.31–4.34.



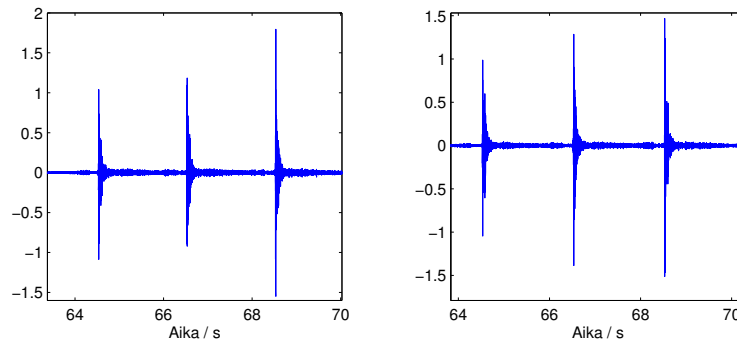
Kuva 4.30: Suunta-analyysin ensimmäinen versio. Ristikorrelaatiomaksimi löytyy selvästi häiriöttömässä tapauksessa (vasemmalla). Piikit ovat selviä ja kohina hyvin vähäistä. Oikealla on auton äänen häiritsemä tapaus. Kohinaa on runsaasti, eivätkä piikit ole selkeitä. Oikeassa kuvassa maksimi osuukin sivuun, ja tulos näyttää äänen tulosuunnaksi läheisen tien.



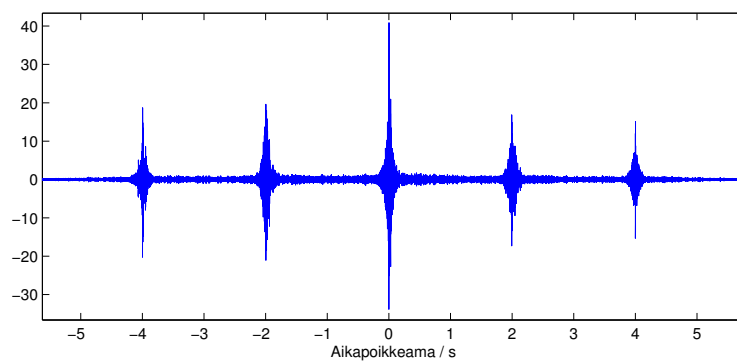
Kuva 4.31: Suunta-analyysin ensimmäinen vaihe: Signaali sellaisenaan aikatasossa. Vasemmalla ylämikrofonin äänite, oikealla alamikrofonin äänite.



Kuva 4.32: Suunta-analyysin toinen vaihe: Signaalista kaistanpäästösuodatettu kaista 200 Hz-1000 Hz



Kuva 4.33: Suunta-analyysin kolmas vaihe: Ristikorrelaatio laskettu herätteen pyyhkäisyn kanssa.



Kuva 4.34: Suunta-analyysin neljäs vaihe: Edellisen vaiheen ristikorrelaatioiden ristikorrelaatio. Korkeimman piikin ero nollakohdasta kuvaa kanavien välistä aikaeroa. Kuvan tapauksessa aikaero on noin 1,2 ms.

Luku 5

Yhteenveto ja loppupäätelmät

Työn tavoitteena oli kehittää signaalianalyysiohjelmisto, jolla mittausaineistosta saataisiin selville taustakohinatason vaihtelu, äänen etenemisvaimennus sekä etenemisviive lähteestä vastaanottopisteeseen. Lisäksi haluttiin selvittää äänen tulosuunta mikrofoni antenniin nähden.

Työn alussa esitettiin äänen etenemiseen vaikuttavia tekijöitä ja tutkimuksessa käytettävä mittausjärjestelmä. Tämän jälkeen kuvattiin kehitetty signaalianalyysiohjelmisto tutkimuksessa saadulle mittausaineistolle.

Koska ohjelmiston piti saada tulokset selville mittauksista automaattisesti, tulossuureet valittiin mahdollisimman selkeiksi. Manuaalista tarkastusta ei näin suurelle mittausaineistolle voi tehdä, joten tulokset sisältävät myös luotettavuusparametrejä. Myös huono signaali-kohinasuhde suuressa osassa mittauksia lisäsi entisestään luotettavuusparametrien merkitystä. Kaikissa analyyseissä pyrittiin pysymään yksinkertaisissa ratkaisuissa, joita tarpeen vaatiessa voidaan vielä myöhemmin kehittää.

Työssä kehitetylle ohjelmistolle ei asetettu erityisiä tehokkuusvaatimuksia. Eniten laskenta-aikaa kuluu mittaussignaalien lukemiseen Matlab-ohjelmaan. Tämä johtuu käytetystä korkeasta näytteenottotaajuudesta. Koska analyysit voidaan ajaa eräajoina esimerkiksi yöllä, laskennalliset vaatimukset eivät kuitenkaan ole kovin rajoittava kriteeri.

5.1 Taustakohina- ja etenemisvaimennusanalyysit

Taustakohina-analyysi toteutettiin suoraviivaisesti. Kohinan tasot lasketaan ajan ja taajuuden funktiona lyhytaikaisspektrianalyysin avulla.

Etenemisvaimennusanalyysi on periaatteeltaan samankaltainen kuin taustakohina-analyysi.

Hankaluuksia aiheutti kuitenkin se, että signaali-kohinasuhde on monissa mittauksissa huono. Tämän vuoksi tasolaskennassa käytetty taajuuskaista piti kaventaa mahdollisimman kaapeaksi. Samalla piti kuitenkin ottaa huomioon signaalin moduloituminen siirtotiellä ja siten laskettava kaista piti määrittää riittävän leveäksi. Kaistanleveys valittiin lopulta testien perusteella.

Etenemisvaimennusmittaukseen suunniteltiin myös taustakohinatason seuranta mittauksen aikaisen signaali-kohinasuhteen arvioimiseksi. Ei kuitenkaan riittänyt, että mittauksesta poistettiin pelkät lähetettävät sinitaajuudet FFT-kaistanestosuotimella. Testauksessa nimittäin havaittiin, että kaiuttimet aiheuttivat lähtevään signaaliin myös harmonisia ja keskeismodulaatiokomponentteja. Tämän vuoksi estokaistojen määrä lisääntyi useilla kymmenillä, ja valmis suodin aiheutti useiden desibelien vaimennuksen taustakohinatasoon. Suotimen aiheuttama vaimennus selvitettiin erikseen kullekin terssikaistalle.

Etenemisvaimennusanalyysistä jäi puuttumaan lähtevän äänitason huomioiminen. Tämä johtui siitä, että kaiutinten äänitehomittausten tuloksia ei tullut tämän työn aikana. Käytännössä siis työssä kehitetty etenemisvaimennusanalyysi koskee ainoastaan vastaanotto-pisteen äänitason laskemista.

5.2 Etenemisviiveanalyysi

Etenemisviiveen selvittäminen aineistosta oli haastava tehtävä. Kirjallisuudessa on käsitelty vastaavia ongelmia hyvinkin laajasti. Kuitenkin työhön käytettävissä oleva aika rajoitti analyysin kehittämistä. Lopulta päädyttiin käyttämään ristikorrelaatiota analyysissä, ja analyysistä saatiinkin varsin toimiva.

Menetelmän tarkkuutta rajoittaa tapa, jolla vastaanotetun signaalin alkuhetki valitaan ristikorrelaatiofunktioista. Luotettavuutta ja tarkkuutta on pyritty parantamaan soveltamalla Hilbert-verhokäyrän käyttöä analyysiin. Tätä tekniikkaa ei valitettavasti voitu käyttää lyhyiden sinipyyhkäisyjen mittauksissa, joita tehtiin kesän 2004 ajan. Jatkokehityksessä menetelmän luotettavuutta pitäisi pyrkiä parantamaan. Huonolla signaali-kohinasuhteella nykyinen menetelmä voi antaa virheellisiä tuloksia pitkienkin sinipyyhkäisyjen tapauksessa.

5.3 Suunta-analyysi

Suunta-analyysi tehtiin hyvin yksinkertaisesti ristikorrelaatioiden avulla. Menetelmässä hyödynnettiin vastaanottoantennin neljää eri mikrofonia. Koska käytössä oli kahdeksan mikrofonia, luotettavuutta olisi voinut lisätä esimerkiksi käyttämällä analyysissä useita mikrofo-

nipareja ja keskiarvoistamalla näitä.

Nykyistä suunta-analyysiä ei ole kokeiltu ajaa suurelle aineistojoukolle. Jatkokehityksessä pitäisi kiinnittää huomiota analyysin luotettavuuteen ja toimivuuteen kyseessä olevalle mitausaineistolle. Testausta voisi tehdä myös soittamalla herätteitä mikrofoni antennin lähellä eri suunnista mikrofoni antenniin nähden ja eri signaali-kohinasuhteilla.

Analyysiohjelmisto saatiin pääpiirteissään toteutettua tavoitteiden mukaisesti. Luotettavuutta kuvaavia parametrejä liitettiin analyysituloksiin. Näin pystyttiin helpottamaan tulosten jatkokäsittelyä, kun analyysituloksia ja säähavaintoja tullaan käyttämään mallinnuksessa.

Kirjallisuutta

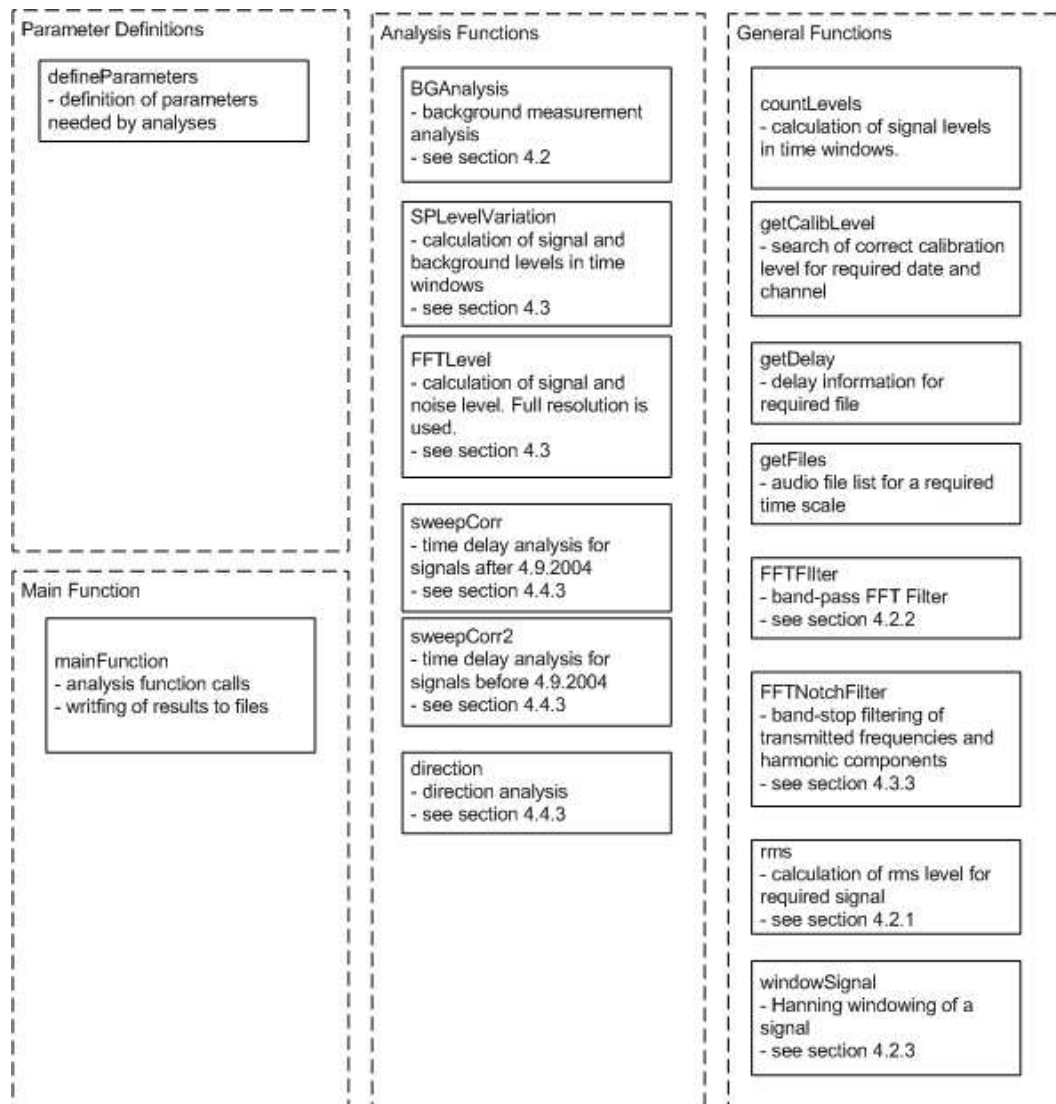
- [1] Malcolm J. Crocker, editor. *Encyclopedia of Acoustics*, volume 1, chapter 32. New York: Wiley, 1997.
- [2] Uno Ingård. A review of the influence of meteorological conditions on sound propagation. *J. of the Acoustical Society of America*, 25:405–411, 1953.
- [3] Mervi Karru ja Panu Maijala. Automaattinen ilmakehän akustiikan mittausjärjestelmä. Technical report, VTT tuotteet ja tuotanto, 2004.
- [4] Giovanni Jacovitti and Gaetano Scarano. Discrete time techniques for time delay estimation. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 41:525–533, 1993.
- [5] Y. Tanioku K. Konishi and Z. Maekawa. Long time measurement of long range sound propagation over an ocean surface. *Applied Acoustics*, pages 149–172, 2000.
- [6] Matti Karjalainen. *Kommunikaatioakustiikka*. Teknillinen korkeakoulu, 2000. Raportti 51 / Teknillinen korkeakoulu, sähkötekniikan osasto, akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio.
- [7] Helmut Klug. Sound-speed profiles determined from outdoor sound propagation measurements. *J. of the Acoustical Society of America*, 90:475–481, 1991.
- [8] K. Konishi and Z. Maekawa. Interpretation of long term data measured continuously on long range sound propagation over sea surfaces. *Applied Acoustics*, pages 1183–1210, 2001.
- [9] Tapio Lahti. *Akustinen mittaustekniikka*. Teknillinen korkeakoulu, 1997. Raportti 38 / Teknillinen korkeakoulu, sähkötekniikan osasto, akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio.
- [10] Conny Larsson. Atmospheric absorption conditions for horizontal sound propagation. *Applied Acoustics*, pages 231–245, 1997.

- [11] Conny Larsson and Sven Israelsson. Effects of meteorological conditions and source height on sound propagation near the ground. *Applied Acoustics*, pages 109–121, 1991.
- [12] Sanjit K. Mitra. *Digital Signal Processing*. McGraw-Hill, 2001.
- [13] Kari Pesonen. Hiljaiset alueet. hiljaisuuteen vaikuttavat tekijät ja hiljaisuuden kriteerit. Technical report, Ympäristöministeriö, 2004.
- [14] Erik M. Salomons. *Computational Atmospheric Acoustics*. Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [15] J.M. Vaquero, R. Vélchez-Gómez, J.A. Méndez-Sierra, J.M. Barrigón-Morillas, and V. Gómez Escobar. Analysis of an early measurement of the speed of sound propagation in the atmosphere. *Applied Acoustics*, pages 59–67, 2004.
- [16] Francesco Viola and William F. Walker. Comparison of time delay estimators in medical ultrasound. In *Ultrasonics Symposium, 2001 IEEE*. Department of Biomedical Engineering, University of Virginia, 2001.

Liite A

Matlab-funktiot

Ohessa on esitetty Matlab-ohjelmiston funktiot ja tehtävät toiminnallisuuden mukaan järjestettyinä.

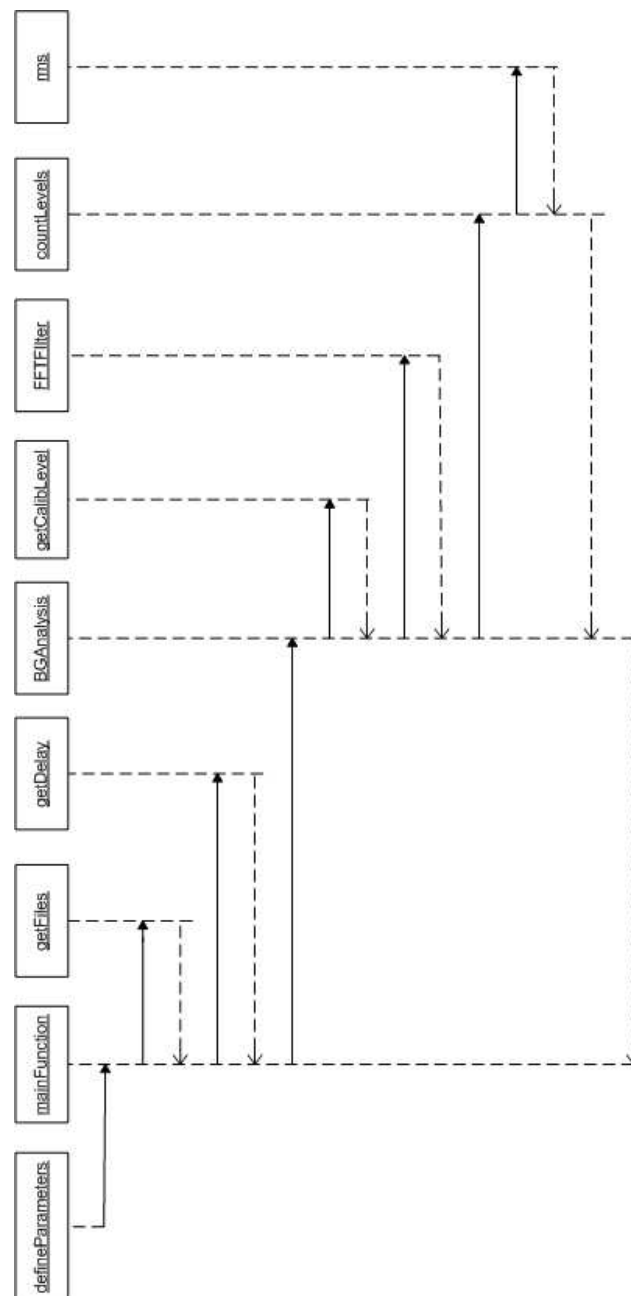


Liite B

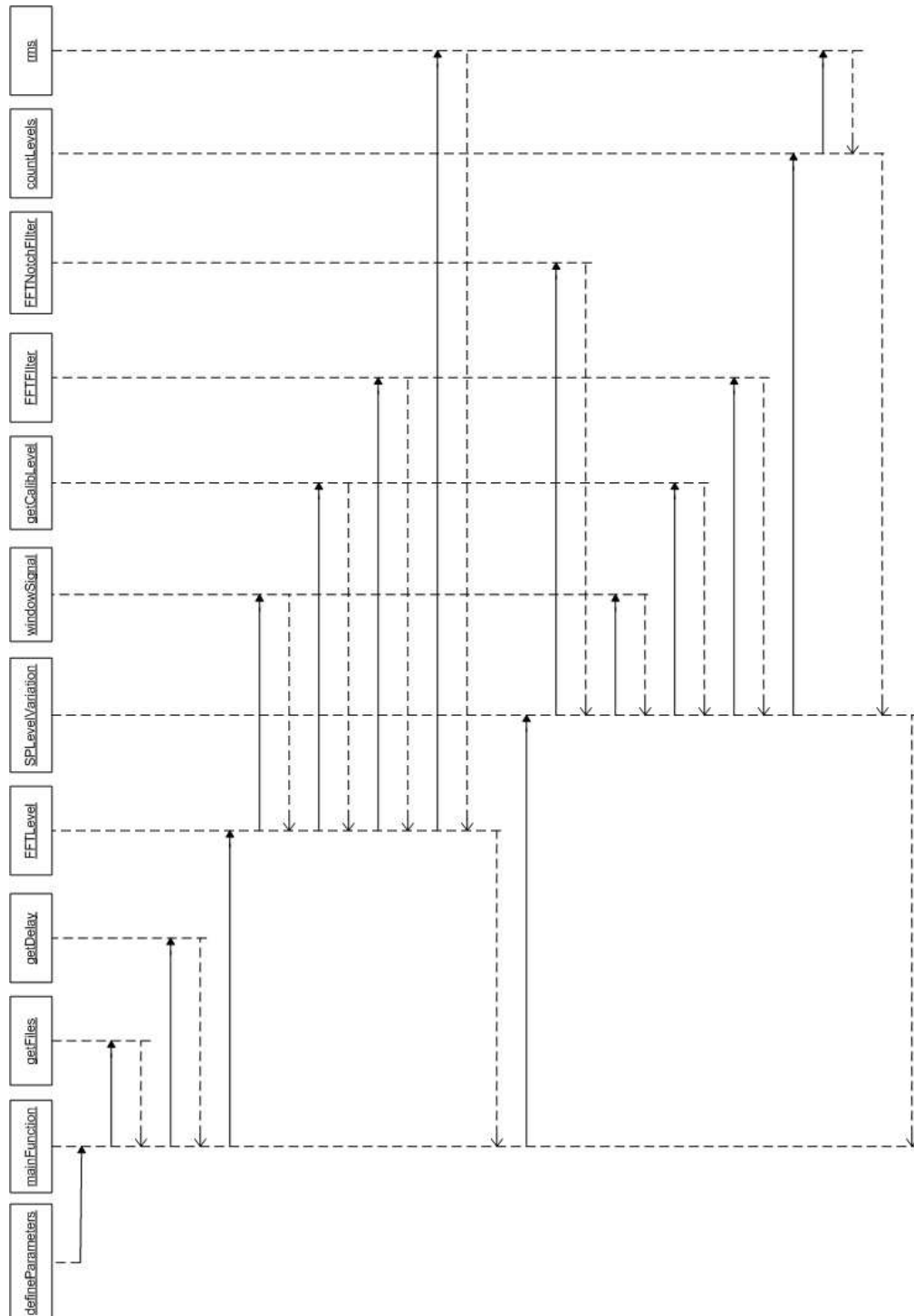
Sekvenssikaaviot

Ohessa on esitetty eri analyysien funktiokutsut sekvenssikaavioina. Kaavioissa aika kulkee ylhäältä alaspäin. Yhtenäinen nuoli tarkoittaa funktiokutsua, katkoviivalla piirretty funktion arvon palauttamista.

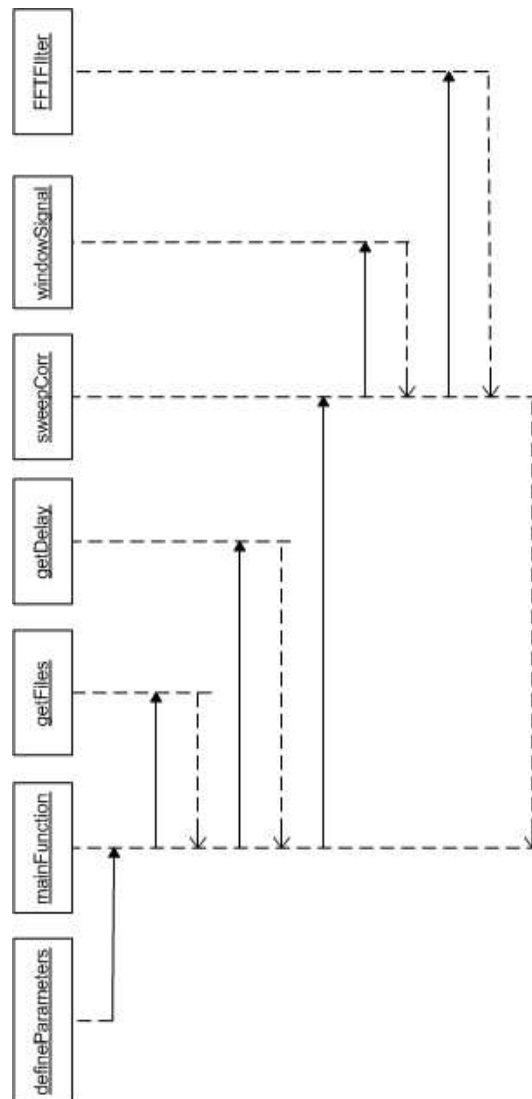
B.1 Taustakohina-analyysi



B.2 Enenemisvaimennusanalyysi



B.3 Etenemisviiveanalyysi



B.4 Suunta-analyysi

