

INFRAÄÄNIALUETAJUUKSIEN MITTAAMINEN EMFI-KALVOLLA

Jaakko Noronen

Opinnäytetyö
Helmikuu 2015

Hyvinvointiteknologian koulutusohjelma
Tekniikan ja liikenteen ala





Tekijä(t) NORONEN, Jaakko	Julkaisun laji Opinnäytetyö	Päivämäärä 28.02.2015
	Sivumäärä 51	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: (x)
Työn nimi INFRAÄÄNIALUETAJUUKSIEN MITTAAMINEN EMFI-KALVOLLA		
Koulutusohjelma Hyvinvointiteknologia		
Työn ohjaaja(t) STRÖM, Markku RANTAPUSKA, Seppo		
Toimeksiantaja(t) RÄISÄNEN Heikki, Emfit Oy, toimitusjohtaja		
Tiivistelmä <p>Infraääni on tieteen alue, jota on tutkittu huomattavan vähän verrattuna esimerkiksi ultraääneen. Sitä tutkivia tai hyödyntäviä sovellutuksia on erittäin vähän. Merkittävimmät infraääntä havainnoivat tai tuottavat laitteistot on kehitetty 1900-luvun taitteen jälkeen lähinnä sotavoimien toimesta tai maanjäristys- ja tsunamivaroitusjärjestelmiksi.</p> <p>Opinnäytetyön tavoitteena on suunnitella ja valmistaa infraääntä havainnoiva laitteisto käyttäen hyödyksi elektromeekaanisen filmin kapasitiivisia ominaisuuksia. Tarkoituksena on löytää sopivat materiaalit anturin toiminnan kannalta, löytää tarvittava esivahvistinelektronikka signaalinkäsittelyyn, sekä ohjelmoida g-kielillä signaalitiedolle tiedonkeruuohjelma. Opinnäytetyö on tuotekehitysprojekti ja lopputulemana on sekä prototyyppi että ensiaskeleet tulevalle jatkokehitykselle aiheen ympäriltä.</p> <p>Opinnäytetyö toteutettiin yhteistyössä Vaajakoskella toimivan Emfit Oy:n sekä sen tuotekehityksestä vastaavan henkilökunnan kanssa. Prototyypin valmistamiseen kerättiin taustatietoa olemassa olevista sovellutuksista ja käytettiin hyväksi myös yrityksen jo olemassa olevia tietoja yrityksen valmistaman anturin ympäriltä.</p> <p>Prototyypillä saatuja tuloksia ja niistä tehtyjä päätelmiä ei voida suoraan pitää täysin paikkansapitävinä, vaan niihin täytyy suhtautua varauksella niiden ollessa vasta ensimmäisten testien tuloksia. Tuloksia ei myöskään voida verrata juuri mihinkään jo tehtyihin tutkimuksiin, sillä kyseisellä anturiteknologialla ei ole aikaisemmin tehty vastaavia mittauksia. Prototyyppi ja tehdyt mittaukset toimivat kuitenkin jatkossa hyvänä lähtökohtana tuleville tuotekehitysprojekteille aihealueella.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Infraääni, esivahvistinelektronikka, g-kieli ohjelmointi, elektromeekaaninen filmi, mittaukset, prototyyppi, tuotekehitys		
Muut tiedot		



Author(s) NORONEN, Jaakko	Type of publication Bachelor's thesis	Date 28.02.2015
	Number of pages 51	Language of publication: Finnish
		Permission for web publication: (x)
Title of publication MEASURING INFRASOUND FREQUENCIES WITH EMFi-FILM		
Degree programme Wellness Technology		
Tutor(s) STRÖM, Markku RANTAPUSKA, Seppo		
Assigned by RÄISÄNEN Heikki, Emfit Oy, CEO		
<p>Abstract</p> <p>Infrasound is a field in science that has received very little study compared to, for example, ultrasound. Applications that explore or utilize infrasound are still very few in numbers. The most significant infrasound perceiving or producing equipment were developed around 1900's, primarily for military use and warning systems for earthquakes and tsunamis.</p> <p>The aim of this study is to design and produce observational equipment utilizing the electro-mechanical properties of the EMFi-film capacitive sensor, for infrasound measuring. The aim is to find the suitable materials for the sensor to operation optimally, to find the required preamplifier electronics for signal processing, as well as to program a data acquisition program with g-language. The thesis is a research and development project, and the end result will be a functional prototype and the first steps for future development around the topic.</p> <p>Study was carried out in cooperation with Emfit Ltd, as well as with its product development staff. The thesis' author had to collect background information not only from the company's own knowledge from the area, but also information on the existing applications.</p> <p>The results and conclusions derived from using the prototype cannot be directly considered to be entirely true, but that they must be treated with caution whilst they are only the first results of a long line of tests. The results cannot be compared to any existing studies, since this sensor technology has not previously been responsible for infrasound measurements. The prototype and the measurements taken, however, continue to serve as a good starting point, as future product development projects will be implemented in the area of study by Emfit Ltd.</p>		
Keywords/tags Infrasound, pre-amplifier, g-language programming, electromechanical film, measurements, prototype, product development		
Miscellaneous		

ALKUSANAT

Tämän opinnäytetyön aihe saatiin jo toistakymmentä vuotta Suomessa toimineelta Emfit Oy:ltä. Opinnäytetyöstä kehkeytyi puolen vuoden aikana laajempikin tuotekehitysprojekti Emfit Oy:n toimitusjohtajan innovatiivisten visioiden johdolla ja sen suunniteltu lopputulema ennätti vaihtua useaan otteeseen, sillä aiheen tiimoilta olisi hyvin paljon erilaisia mahdollisuuksia edetä tuotteistamiseen. Projektin suunta ja laatu olivat kuitenkin selkeitä alusta lähtien, sillä sen tiedettiin olevan pioneerityötä yllättävänkin vähän tutkitulta aihealueelta. Projektiin uhrattiin aikaa ja rahaa, mutta kantavin voima on ollut mielenkiinto aiheeseen, joka piti mielen virkeänä ja motivaation korkeana koko projektin ajan.

Vaikka allekirjoittanut teki päivä- ja yötoita opintojensa ohessa yli kolme vuotta, riitti aikaa ja jaksamista silti tarpeeksi myös tämän työn viimeistelyyn. Jaksamisesta ja tähänastisen työn hedelmistä voidaan kiittää läheisiä ja rakkaita perheenjäseniä, tärkeitä ystäviksi kehkeytyneitä opiskelutovereita sekä monessa liemessä keitettyjä työkavereita. Olette olleet ja tulette varmasti jatkossakin olemaan se kantava voima jonka vuoksi näitä hommia jaksetaan painaa - oli niissä sitten järkeä tai ei.

Erityiskiitokset työn valmistumisesta kuulunee kuitenkin Heikki Räisäselle jonka ansiosta en ottanut sitä huonompaa aihetta, Jouni Mitjoselle jota ilman ei työhön olisi elektroniikkaa saatu valmistettua vielä tänäkään vuonna, sekä Lasse Räisäselle jonka apu oli korvaamaton graafisen ohjelmoinnin suhmuroidissa. Kiitokset kuuluvat myös Tomille Saksaan, joka pystyi nipistämään osan rajallisesta ajastaan myös tälle tutkimukselle. Unohtamatta tietenkään henkilökohtaista kieliasun tarkistajaani, ilman sinua tästä työstä ei olisi tullut lähimainkaan näin ymmärrettävää asiasta tietämättömälle.

“The public and scientific interest in a relatively unknown phenomenon, like infrasound, should come from the appeal of its applications, because it can-not directly be experienced by humans.”

*Láslo G. Evers
The Inaudible Symphony*

Sisällys

1 JOHDATUS AIHEESEEN	8
1.1 Opinnäytetyön lähtökohdat	8
1.2 Tehtävänanto.....	9
1.3 Projektin tavoite ja hyödynsaajat	9
2 EMFI-KALVO	10
2.1 EMFi-kalvon rakenne	10
2.2 EMFi-kalvon toimintaperiaate	11
2.3 Kalvon vanhentaminen, kapasitanssi ja voimallisuus.....	12
3 INFRAÄÄNI	13
3.1 Infraääni yleisesti.....	13
3.2 Infraäänien aallonpituus.....	15
3.3 Infraäänien lähteet.....	17
3.4 Infraäänien tutkiminen	20
3.5 Ilma-alusten jättöpyörteet	21
3.6 Maanjärjestyksiä edeltävät infraääniaallot	24
4 EMFI-ANTURIN VALMISTUS JA KOTELOINTI	26
4.1 Taustatietoa kotelointiin	26
4.2 Emfi-antureiden valmistaminen infraäänimittauksia varten.....	28
4.3 Anturin kotelointi	29
4.4 Kaapelointi ja sijoittaminen kentälle	31
5 SIGNAALINKÄSITTELY	32
5.1 Analoginen ja digitaalinen signaalinkäsittely.....	32
5.2 Esivahvistinelektronikka	33
5.3 Infraäänimittauksiin valjastettu varausvahvistin	34
5.4 Labview-ohjelmointi	36
6 KÄYTÄNNÖN MITTAUKSET	38
6.1 Laitteiston testimittaukset.....	38
6.2 Mittaukset Saksassa	39
7 TULOKSET	40
7.1 Prototyypilaitteisto.....	40
7.2 Testimittaukset	42
7.3 Saksassa tehtyjen mittausten tulokset	43
8 POHDINTA	44
8.1 Yhteenveto	44
8.2 Hyöty ja jatkotoimenpiteet.....	46

LÄHTEET	48
LIITTEET	51
Kuvio 1 EMFi-kalvon rakenne (Emfit Oy, 2014)	10
Kuvio 2 EMFi-kalvoa (Emfit Oy, 2014)	12
Kuvio 3 Äänitaajuusalueet (fathomfrontiers.com, 2014)	14
Kuvio 4 Ei-sinimäisen aallon aallonpituus (Pain, 1983).....	16
Kuvio 5 Infraäänten aallonpituudet (Pain, H. J. 1983)	17
Kuvio 6 Infraäänien lähteitä (meteor.uwo.ca, 2014)	19
Kuvio 7 Infraääntä havainnoiva tutka Tristan da Cunhassa (ctbto.org, 2014).....	21
Kuvio 8 Jättöpyörteiden varo-ajat (AFSOC Crash Report Faults Understanding Of Osprey Rotor Wake, 2014)	22
Kuvio 9 Lentokoneen jättöpyörteet (aviationexplorer.com, 2014)	23
Kuvio 10 Viiden havainnointiaseman infraäänien spektrogrammit (LÜ ym., 2014)	25
Kuvio 11 Testien perusteella tehty kuvaaja, kun on mitattu infraääniä ilman kotelointia ja koteloinnin kanssa. Korkeammat taajuudet alkavat resonoimaan yli 10Hz kohdalla. (Shams ym., 2008)	27
Kuvio 12 Testien perusteella tehty kuvaaja, jossa on testattu äänen läpituikutuvuutta polyuretaanituulilasin läpi. (Shams ym., 2008)	27
Kuvio 13 Anturilaatikon mitat	30
Kuvio 14 Anturin sovitus laatikon pohjalle.....	31
Kuvio 15 Varausvahvistimen periaatekuva (Emfit Oy 2015).....	35
Kuvio 16 Dataloggerin käyttöliittymä.....	37
Kuvio 17 Notepadeihin tallentuneet lukusarjat	38
Kuvio 18 Testitulokset Excel-taulukossa	39
Kuvio 19 Prototyypilaitteisto.....	41
Kuvio 20 Testitulosten pohjalta lasketut taajuudet arvohuipuista.....	42

1 JOHDATUS AIHEESEEN

1.1 Opinnäytetyön lähtökohdat

Tarve tutkimus- ja tuotekehitysprojektille infraäänten parissa tuli mittausteknologian puolelta. Idea lähti aluille mittausteknologiselta yritykseltä, Emfit Oy:ltä, jossa on jo toista vuosikymmentä käytetty erinäisiin sovelluksiin omatuotettua elektromekaanista filmiä eli EMFi-kalvoa. Yrityksellä on laaja repertuaari omien ja ulkoisten projektien osalta, ja tämä opinnäytetyö on osa yrityksen uusia tuotekehitysprojekteja. Infraääntä hyödyntäviä sovellutuksia ei ole suuremmin vielä tehty, mutta ensimmäisiä hajanaisia tutkimuksia on toteutettu jo toisen maailmansodan aikoihin. Infraäänten haittavaikutuksista on kiistelty useissa uusimmissa tutkimuksissa, mukaan lukien tuulivoimaloiden synnyttämien infraäänten vaikutuksista ympäristöön.

Toimeksiantajana toimi Emfit Oy:n toimitusjohtaja Heikki Räisänen. Kehittämisen toimeksiantajan toiveena oli saada laite, jolla voitaisiin mitata ja tutkia infraääniä useissa eri ääni- ja värähtelylähteissä. Laitteen kaupallisella versiolla tapahtuva seuranta toimisi etänä yrityksen oman palvelimen kautta.

Projekti oli täysin tuotekehitys- ja tutkimustyötä. Projekti oli jo alkanut allekirjoittaneen toimesta ennen aiheen valitsemista, muun muassa prototyyppien rakentamisella ja aiheen tutkimisella. Alustavaa tietotaitoa ei aiheesta juurikaan ollut työn tekijällä tai tilaajalla, joten aiheeseen lähdettiin avoimin mielin. Ensimmäisten palaverien ja artikkelien lukemisen jälkeen aiheen tiimoilta muodostui nopeasti käsitys siitä, kuinka tärkeä aihe oli, ja kuinka suuret tulevaisuudennäkymät siinä vielä saattaisi olla.

1.2 Tehtävänanto

Tehtävänantona oli rakentaa infraääniä havaitseva prototyypilaitteisto sekä löytää sen rakentamiseen tarvittava materiaali ja teoriatieto. Mittaukseen liittyvien vahvistimien sekä dataloggerin valmistaminen olivat myös osa tehtävänantoa. Myös kilpailevat sovellutukset oli otettava huomioon tätä tutkimusta toteuttaessa, sillä niistä saadaan monesti sekä arvokasta referenssiä että suuntaa tulevalle kehitykselle.

Aikamääreitä ei projektin aikana ollut, joten opinnäytetyötä tehtiin usein muun työn ohessa keskellä viikkoa sekä viikonloppuisin. Käytännön mittauksiin varattiin kuitenkin kaksi viikkoa aikaa riittävän otannan takaamiseksi.

1.3 Projektin tavoite ja hyödynsaajat

Opinnäytetyön lopputuloksen ensisijaisena hyödynsaajana on projektin tilannut yritys Emfit Oy. Lopputuloksena sovellutuksen on tarkoitus olla pääosin alustusta tuleville tuotekehitysprojekteille aihealueella. Mahdollisia muita hyödynsaajia tulevat olemaan alueet ja yritykset jotka hyötyvät infraäänien havainnoinnista, koska infraäänit ovat usein haitallisia niitä ympäröivälle toiminnalle. Esimerkkeinä voidaan pitää maanjäristysalueita, lentokenttiä, tuulivoimakohteita, isoja tehtaita sekä tornadovyöhykkeitä. Alueille pystyttäisiin sovellutuksella järjestämään ennakkovaroitusjärjestelmä tai muu infraäänitoimintaa havainnoiva ja siitä varoittava järjestelmä.

Tässä työssä oli tekijän tavoitteena perehtyä infraääniin ja niitä mittaaviin olemassaoleviin sovellutuksiin, rakentaa modifioitu anturiaihio EMFi-kalvolle, suunnitella ja rakentaa elektroniikka signaalin vahvistamiseksi sekä ohjelmoida graafisessa käyttöliittymässä mittauksiin soveltuva dataloggeri, eli mittadataa tallentava tietokoneohjelma. Rakennetulla laitteistolla oli tarkoitus käydä tekemässä käytännön mittauksia yhdessä erikseen valitussa kohteessa kahden viikon ajan.

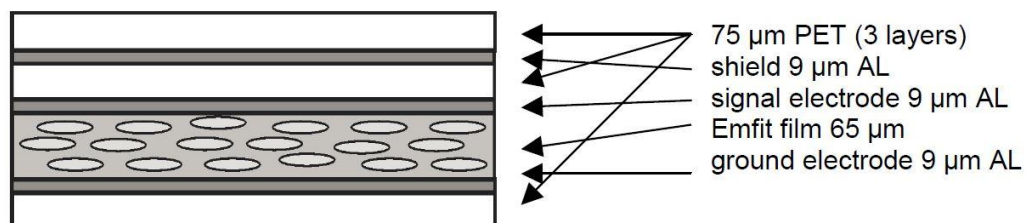
2 EMFI-KALVO

2.1 EMFi-kalvon rakenne

Keksinnön idea syntyi jo 1980-luvun alkupuolella tunnetun keksijän ja insinöörin, Kari Kirjavaisen, toimesta. Hän kehitti yhdessä Valtion Teknillisen Tutkimuskeskuksen (VTT) Valmistustekniikan tutkimusyksikön kanssa joustavan, sähköisesti varatun ja noin 0,05 mm paksun elektromekaanisen filmin.

Elektromekaanisen kalvon perusaine on polypropeenä eli samaa muovia, jota käytetään muun muassa keksipaketeissa (ks. kuvio 2, s. 12). Kalvo on ohutta (n. 50-70 μm), bi-aksaalisesti orientoitua, kuplarakenteista, sähköä johtavilla kerroksilla päällystettyä elastista elektreettimuovikalvoa (ks. kuvio 1). Kalvon sisälle muodostetaan kuplarakenne venyttämällä sitä kahteen suuntaan, jolloin kalvosta saadaan samalla joustava. Sen sähköä johtavat kerrokset ovat alumiinia. Kalvo varataan valmistusprosessin aikana erittäin voimakkaan sähkökentän avulla koronapurkauslaitteella. Polypropeeni on erittäin hyvä eriste, joten menetelmällä saadaan tehokkaasti varaukset loukkuun kalvon sisälle. Näin kalvon toinen puoli on varautunut positiivisesti ja toinen puoli negatiivisesti. Molemmat puolet päällystetään ohuella alumiinikerroksella, jotta varaus saadaan johtumaan mittalaitteistoon laitteiston vaatimalla kaapelilla. Valmiissa anturissa on lisäksi yksi ylimääräinen häiriösuojakerros. (Emfit Oy, 2014)

Fig. 1 L-series sensors structure



Kuvio 1 EMFi-kalvon rakenne (Emfit Oy, 2014)

2.2 EMFi-kalvon toimintaperiaate

Sensorina EMFi-kalvon toiminta perustuu sähköinfluenssiin. Sähkövaraus synnyttää ympärilleen sähkökentän, jonka voimakkuus määrittää kentän positiiviseen varaukseen kohdistaman voiman ja varauksen suhteena. Kahden varauksen välisen voiman määrittelee Coulombin laki kaavassa 1.

Kaava 1:

$$F = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

jossa

- ***F*** on Coulombin lain mukainen sähköinen voima skalaarimuodossa
- ***k*** on Coulombin vakio
- ***q₁*** ja ***q₂*** on kummankin hiukkasen sähkövaraus
- ***r*** on hiukkasten välinen etäisyys

Kun EMFi-kalvoon syntyy muodonmuutos ulkoisen voiman vaikutuksesta, tapahtuu samalla kalvon sisällä olevassa varausjakaumassa muutos, joka muuttaa myös ulkoista sähkökenttää. Ulkoinen sähkökenttä aiheuttaa Coulombin lain mukaisen voimavaikutuksen kalvon pinnalla olevien metallielektrodien varauksiin, synnyttäen metallipinnalle sisäisen sähkökentän. Kentän voimakkuus kasvaa arvoon, missä sisäinen kenttä kumoaa ulkoisen kentän vaikutuksen. Tämä elektrodien välille syntyvä varausjakaumaero voidaan havaita jännite- tai kapasitanssimittauksella (Nilsson & Riedel 2000).



Kuvio 2 EMFi-kalvoa (Emfit Oy, 2014)

2.3 Kalvon vanhentaminen, kapasitanssi ja voimalinearisuus

Kalvon varaukset katoavat ajan kuluessa, sillä kalvon eristyskyky ei ole täydellinen. Varausten karkaaminen on riippuvainen vallitsevasta lämpötilasta. Kalvoa voidaan vanhentaa lämmittämällä sitä yli 50 asteen lämpötilassa 1-5 vuorokauden ajan.

Nopeinta varausten karkaaminen on vanhennuksen alkuvaiheessa. Karkailu stabiloituu ajan myötä, sillä pitkässä vanhennusprosessissa pyritään jättämään vain pysyvät varaukset jonka jälkeen kalvon stabiilius on hyvä vuosiksi eteenpäin (Emfit Oy 2014).

Kalvo toimii myös kondensaattorina, jonka kaksi lähekkäin olevaa johdinpintaa ja niiden välissä oleva eriste muodostaa. L-tyypin EMF-kalvon kapasitanssi on noin 22 pF/cm². Kalvon varausmuutos on myös suoraan verrannollinen paineeseen. Voidaan olettaa että herkkyysarvo on vakio niin kauan kun jousto tapahtuu kalvon ilmaväleissä.

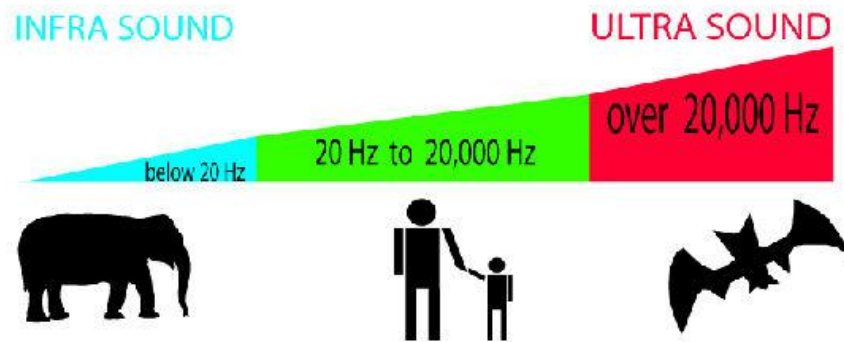
Voimalinearisuudessa on kyse eri voimatasoilla tapahtuvista kalvon herkkyyden muutoksista. EMFi-kalvon voimalinearisuuden virhe on jopa alle 6 % välillä 0-1000N. (Hillenbrand & Sessler 1999)

3 INFRAÄÄNI

3.1 *Infraääni yleisesti*

Ääniaallot ovat pitkittäisaaltoja, joiden hiukkasten tai oskillaattorin liike on samaan suuntaan kuin aallon etenemisnopeus. Kaasun läpi kulkeva ääniaalto häiritsee kaasun tasapainotilaa harventamalla ja puristamalla sen olomuotoa. Ääniaallot ovat elastisia aaltoja, joten kun partikkelit siirtyvät, siirtymän verrannollinen voima toimii partikkelien alkuperäisen aseman palauttajana (Pain 1983). Mikään ääni ei kuitenkaan etene tyhjiössä, sillä ääniaallot pystyvät etenemään vain väliaineessa. Väliaine voi olla missä olomuodossa tahansa, kuten nesteinä, kaasuna, kiinteänä tai plasmana. Kaasuissa ja nesteissä ääni voi kulkea vain pitkittäisenä aaltoliikkeenä, kun kiinteissä aineissa voi esiintyä myös poikittaisia ääniaaltoja.

Kaasu voi johtaa ääniä suurella taajuuskaalalla. Ilmassa kulkevat ääniaallot ovat ihmisen kuultavissa kun niiden taajuus on 20 Hz ja 20 000 Hz väliltä (ks. kuvio 3, s. 14). Ultraäänit ovat ihmisen kuuloalueen yläpuolella, eli ne ovat yli 20 000 Hz. Esimerkiksi delfiinit käyttävät laajakaistaisia ultraääniklikkauksia (80-220kHz) kaikuluotaukseen ja meressä suunnistamiseen. Spektrin toisessa päässä olevat ääniaallot ovat myös ihmisen kuuloalueen ulkopuolella, jolloin taajuus on alle 20Hz. Näitä ääniaaltoja kutsutaan infraääniksi. Infraääni on verrattavissa matalan taajuuden valoon jota kutsutaan infrapunaksi ja se on näkymätöntä ihmissilmälle. Infraäänien alarajan määrittää ilmakerroksen tiheys. Kun infraäänien aallonpituudesta tulee liian pitkä, maapallon painovoima alkaa vaikuttaa massan siirtymään. Jos painovoimasta tulee osa palautusvoimaa, syntyy akustista painovoimaa ja painovoiman aaltoja. Painovoima on tärkeää kun infraäänien taajuus on 0.01Hz tai sen alle, ja suunnilleen 0.002Hz alueella painovoiman aallot sivuuttavat akustiset aallot (Gossard ja Hooke 1975). Taajuuden lisäksi ääniaalloilla on muitakin ominaisuuksia kuten etenemisnopeus ja amplitudi.



Kuvio 3 Äänitaajuusalueet (fathomfrontiers.com, 2014)

Infraääni kulkee äänen nopeudella, eli 344 m/s, kun ympäröivän ilman lämpötila on 20 °C lähellä maanpintaa. Nopeus voi kasvaa kahdesta syystä: kun lämpötila kasvaa, tai jos infraääniaallot ovat myötätuulen vaikutuksen alaisena. Lisäksi nopeuteen vaikuttaa kaasun tyyppi eli materiaalin perusominaisuus, joka pätee myös nesteille ja kiinteille aineille. Ilmassa voi esiintyä myös matalan taajuuden ääniä vaikka sen nopeus olisikin alle äänennopeuden, mutta palauttavana voimana toimii tällöin painovoima. Painovoima-aallot kulkevat tyypillisesti tuulennopeuden mukaisesti skaalalla 1 - 10 m/s (Evers, Láslo G., 2008).

Koska infraäänien aallonpituus on niin pitkä ja hitaasti vaimentuva, se voi matkata valtavia etäisyyksiä. Muun muassa Krakataun tulivuoren purkaus synnytti niin valtavia paineaaltoja, että sen tuottamat infra-aallot kulkivat maapallon ympäri useita kertoja.

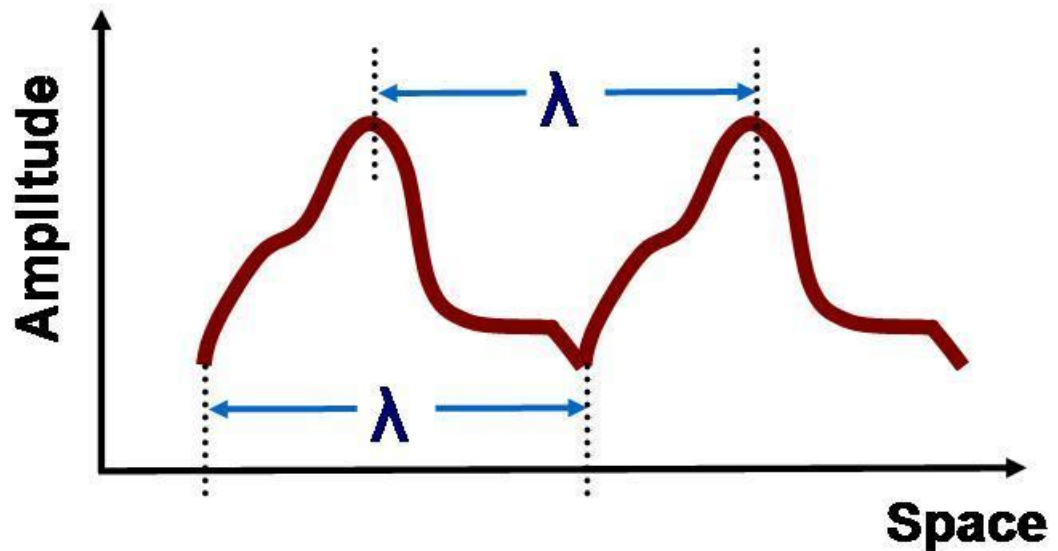
Infraääntä on linkitetty usein myös paranormaaleihin ilmiöihin ja muihin pelkoa herättäviin tilanteisiin ja efekteihin. Mystisesti sammuksiin puhalletut kynttilät, oudot sensaatiot ja kylmät väreet voivat olla, ei niinkään kummitusten aiheuttamia, vaan erittäin matalien äänien tuottamia tunteita ja tapahtumia. Brittitutkijat ovat osoittaneet kontrolloidussa kokeessa erittäin matalan bassoäänien tuottavan ihmisessä laajan kirjoituksen tunteita, kuten levottomuutta, surua ja vilunväristyksiä. Havainnot tukevat suosittuja ehdotuksia infraäänien ja outojen tunteiden välillä (NBC news article 2003).

Insinööri Vic Tandy teki oman tutkimuksensa infraäänien tuottamiin tunteisiin liittyen, kun hän huomasi näkevänsä usvaisia olentoja sivusilmällään. Tandy teki paljon

töitä vanhaan autotalliin rakennetussa pienessä tehtaassa omalla työpöydällään. Tehtaassa oli usein myös muitakin työntekijöitä. Oli yleisesti tiedossa, että rakennuksessa ihmiset kokivat outoja tuntemuksia, mutta ne yleensä sivuutettiin vain insinöörimäisellä ajattelutavalla, kuten syyttämällä laitteita joita oli huoneessa useita. Kerran Tandy kuitenkin jopa pelästyi hetkeksi, kun hän näki huoneessa jotain epänormaalia. Asiaa tutkittuaan ja muutaman hyvän onnenpotkun jälkeen hän ymmärsi, että huoneen läpi kulki n. 19 Hz:n taajuudella ääniaalto, jota ei voinut normaalein aistimuksin huomata. Ääniaalto oli lähtöisin tuulettimesta huoneen toisesta päästä ja sen aallonpituus oli niin optimi, että sen korkein amplitudi keskittyi juuri Tandyn työpöydän kohdalle. Matala taajuus oli saanut sopivalla kohdalla Tandyn silmäkalvon värähtelemään, jolloin omituiset tuntemukset ja näköharhat saivat vallan. (Tandy, Vic and Lawrence, Tony R., 1998: The Ghost in the Machine)

3.2 Infraäänien aallonpituus

Fysiikassa siniaallon aallonpituus on spatiaalisen ajanjakson aaltoetäisyys, jolla aallon muoto toistuu edetessään. Se on yleensä määritelty ottamalla huomioon jatkuvien samassa ajanjaksossa olevien pisteiden etäisyys (ks. kuvio 4, s. 16). Kyseisiä pisteitä ovat aallonharjat, aallonpohjat, tai nollaviivan ylitykset, ja ne ovat tyypillisiä molemmille sekä matkustaville että seisoville aalloille, kuten myös muille spatiaalisille aaltotyypeille. Aallonpituus nimetään yleisesti kreikkalaisella kirjaimella lambda (λ). Käsitettä voidaan myös soveltaa jaksottaisiin ei-sinimäisiin aaltomuotoihin. Termiä aallonpituus käytetään usein myös moduloiduille aalloille ja sinikäyräpäälysteisille moduloiduille aalloille tai aalloille jotka on muodostettu useiden sinikäyrien häiriöistä. Aallonpituuden SI-yksikkö on metri.



Kuvio 4 Ei-sinimäisen aallon aallonpituus (Pain, 1983)

Olettaen, että siniaalto liikkuu kiinteällä aallonnopeudella, on aallonpituuden kääntäen verrannollinen aallon taajuuteen: korkeataajuiset aallot omaavat lyhyemmät aallonpituudet ja matalataajuiset omaavat pidemmät aallonpituudet.

Aallonpituus riippuu väliaineen, kuten tyhjiön, ilman tai veden tiheydestä ja lämpötilasta, jonka läpi aalto kulkee. Taajuuden ja aallonpituuden suhde nähdään kaavasta 2.

Kaava 2:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

jossa

- λ (lambda) on aallonpituus (m)
- v on äänennopeus (m/s)
- f on taajuus (Hz)

Kuvion 5 taulukossa on kuvattu tyypillisten infraäänitaajuuksien aallonpituuksia ilmassa huoneenlämpötilassa, joissa äänennopeus on noin 344 metriä sekunnissa. Matala taajuus, jonka aallonpituus on 344 kilometriä, on todella pitkä aallonpituudeksi sillä 0.001 hertsiä on yhtä kuin 3,6 sykliä tunnissa. Kyseinen tilanne tarkoittaa sitä, että ääniaallon maksimit tulevat aina 14 minuutin välein. (Pain, 1983)

Frequency (f)	Wavelength (λ)
10 Hz	34.4 meters
0.1 Hz	3400 m
0.001 Hz	344 kilometers

Kuvio 5 Infraäänien aallonpituudet (Pain, H. J. 1983)

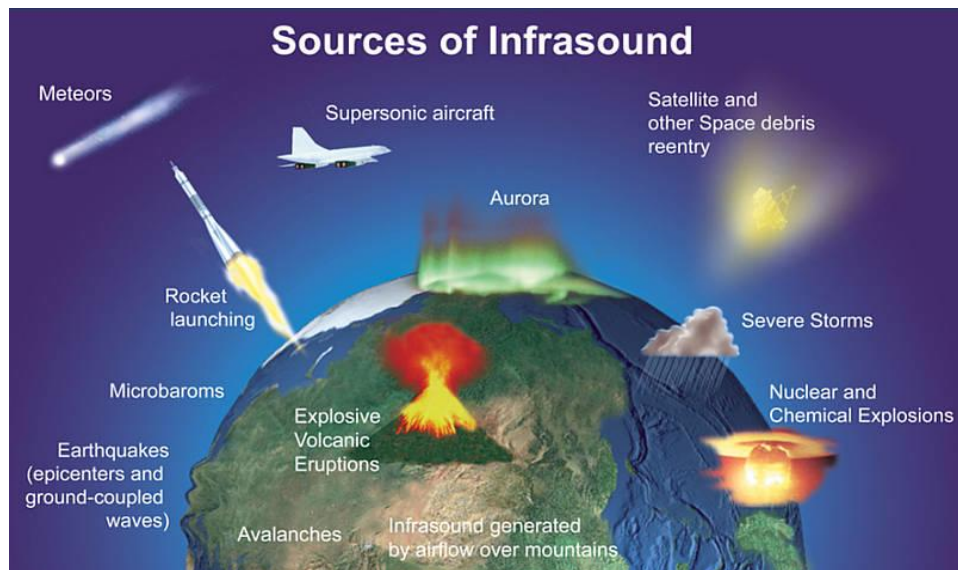
3.3 Infraäänien lähteet

Yleensä infraääni syntyy silloin, kun suuret ilmamassat siirtyvät. Lähteet ovat siis monesti hyvin suuria ja voimakkaita. Esimerkkejä infraäänilähteistä ovat:

- Kaasusoihdut - Liszka (1974) on tutkinut infraäänien tuottoa Pohjanmeren öljykenttien lähistöllä kaasun ulostuloputkista. Uudemmassa tutkimuksessa infraääniä on yhdistetty myös kaasujen palamiseen lähellä öljy- ja kaasukenttiä Kazakstanissa (Smirnov, 2006).
- Kemialliset räjähdykset - Suuret räjähdykset, kuten tahattomat kemialliset räjähdykset, tuottavat infraääniä. Sotilaallisista kokeista ja luonnollisista lähteistä kerättyä infraäänitietoja käytti jo Gutenberg (1939) hyväkseen visualisoidakseen stratosfäärin hiljaisten alueiden taitekerrointa ja vahvoja infraäänisignaleita maanpinnalta tutkittuna.

- Lentokoneet - Säännöllinen lentoliikenne tuottaa infraääniä. Hiljaisena yönä, kun mittausolosuhteet ovat ihanteelliset, lentokoneita voidaan seurata infraäänitutkalla maanpinnalta jopa kymmenen kilometrin korkeudessa ja kolmenkymmenen kilometrin etäisyyksillä.
- Lumivyöryt - Infraääniä syntyy, kun suuret määrät lunta ja jäätä siirtyy. Sveitsin alpeilla on mittauslaitteistoja joilla monitoroidaan lumivyöryjä.
- Maanjäristykset - Maanjäristysten tuottamia infraääniä voidaan monitoroida kahdella eri menetelmällä. Ensinnäkin, ylöspäin kulkevat infraäänit tuottavat häiriöitä ionosfääriin jota voidaan seurata GPS-laitteistoilla, ja toisaalta infraääni voi myös kulkea suoraan lähteen ympäristöstä tarkkailijaan. Molemmissa tapauksissa infraäänit aiheutuvat maanpinnan tasolla, suurilla pinta-aloilla tapahtuvista muutoksista.
- Merelliset aallot - Epälineaarisen vuorovaikutuksen omaavat merelliset aallot, jotka kulkevat lähes vastakkaisiin suuntiin, synnyttävät mikrobaromeita (niin sanottuja meren ääniä) ilmakehässä ja mikroseismejä maankuoressa. Nämä aallot yhtyvät suurten matalapaineiden kanssa merten yllä, jossa voimakkaat tuulet vaikuttavat merenpintaan.
- Meteoriiitit - Infrääntä syntyy kun meteori saapuu ilmakehään. Myös meteorin räjähtäminen palasiksi voi aiheuttaa infraääniä. Useimmat meteorit tuhoutuvat lämpöräjähtäen noin 30-50 km korkeudessa synnyttäen lisää infraääniä. Siperian Tunguskan meteorin tuottamaa infrääntä mitattiin ensimmäisellä mikrobarometrillä Isossa-Britanniassa vuonna 1908.
- Revontulet - Suurten ilmassojen liikkuminen revontulien voimasta ylemässä ilmakehässä synnyttää huomattavia infrääniaaltoja, joita voidaan tutkia maan pinnalta. Revontulien aiheuttamat infrääniaallot huomattiin ensimmäisen kerran Alaskassa (Wilson 1967) ja niitä voi olla revontulista riippuen monia eri tyyppisiä, kuten paine- tai pulssiaaltoja.
- Salamointi - Pilvestä pilveen, tai pilvestä maahan johtavat sähköpurkaukset synnyttävät infraääniä, koska salamakanavan lämpölaajentuminen synnyttää paineaallon. Sähköpurkauksien tapahtuessa pilvessä tapahtuu myös suuria massasiirtymiä, jotka tuottavat yhtäläillä infraääniä.

- Tulivuoret - Ensimmäinen instrumentaalisesti talletettu infraäänitapahtuma oli Krakatoan tulivuoren purkaus Indonesian Javalla vuonna 1883. Paineaaltojen infraäänit tallennettiin perinteisillä barograafeilla, ja ne kiersivät maapallon seitsemän kertaa (Symons 1888).
- Rajuilmat - Suuret myrskyt sisältävät turbulenttisia rakenteita eli tuuliväänteitä kaikilla asteikoilla. Nämä suuret tilavuudet synnyttävät infraääniä joita on mitattu yli 1000km etäisyyksillä (Bowman and Bedard 1971).
- Ydinkokeet - Ilmakehässä tehtävät ydinkokeet synnyttävät infraääniä, jotka voivat kiertää maapallon useita kertoja ydinkokeen suuruudesta riippuen. Muun muassa Novaya Zemlyassa Venäjällä räjäytettiin viidenkymmenen megatonnin kokoinen Tsar-Bomba vuonna 1961. Suurin osa räjähdysenergiasta pakeni avaruuteen, mutta maahan jäänyt energia aiheutti valtavan lämpö- ja paineaallon, jonka infraääniaallot kiersivät maapallon kolmesti.

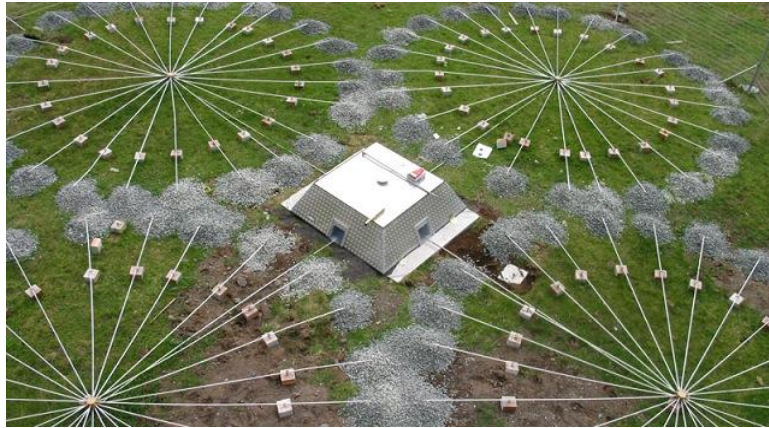


Kuvio 6 Infraäänien lähteitä (meteor.uwo.ca, 2014)

3.4 Infraäänten tutkiminen

Kuten aiemmin mainittiin, infraäänit voivat johtua erilaisista lähteistä luonnollisista tapahtumista ihmisten aiheuttamiin. Lisäksi infraäänit voivat kulkea valtavia etäisyyksiä. Tämän vuoksi infraäänisignaalit sisältävät paljon tietoa näistä tapahtumista. Lähteet eivät ole ainoita, jotka jättävät sormenjälkensä signaaleihin. Myös välittäjä, eli ilmakehä vaikuttaa tallennettuun tietoon. Infraäänten mittaamisella on muun muassa seuraavanlaisia tarkoituksia:

- Ilmakehän monitorointi ydinkokeiden ja –räjähdysten varalta. Infraäänten mittaaminen on tekniikkana käytössä kansainvälisellä monitorointijärjestelmällä (IMS) täydellisen ydinkoekieltosopimuksen (CTBT) kansainvälistä noudattamista varten.
- Jotta voidaan erottaa värinät lähteittäin - aiheutti sen sitten jokin ilmakehässä, tai maaperässä. Pienet maanjäristykset aiheuttavat samoja ilmiöitä kuin ylääänipamaukset, kuten ikkunoiden helinän. Lähteen tunnistaminen on yleisen edun mukaista.
- Jotta saadaan tietoa ilmakehän tilasta. Infraääni voi palvella passiivisena ilmakehän luotaimena, jolla saadaan tietoa tuulesta ja lämpötilasta koko ilmakehän alueelta, termosfäärisiin korkeuksiin asti.
- Jotta voidaan päätellä lähteen piirteitä rikostutkinnassa. Räjähdysten tutkimuksessa voidaan infraäänistä saada tietoa lokaatiosta, tapahtuma-ajasta, räjähdysten lukumäärästä ja mahdollisista alustavista tapahtumista.
- Jotta voidaan monitoroida mahdollisten tulivuortenpurkausten uhkia. Infraääni voi olla hyvä lisä tekniikkana kun tunnistetaan vulkaanisten purkausten esiasteita, jolloin voidaan varoittaa hyvissä ajoin esimerkiksi kantaväestöä tai lentoliikennettä uhasta.
- Sotilaalliseen tiedusteluun, tai muuhun toimintaan, kuten ylääänilentojen havainnoimiseen, ammustenkäytön tarkkailuun tai joukkojen liikkeiden seurantaan pitkilläkin etäisyyksillä. Tätä tietoa voidaan kerätä paikallisesti tai vihollislinjojen takana etäkäytöllä.



Kuvio 7 Infraääntä havainnoiva tutka Tristan da Cunhassa (ctbto.org, 2014)

3.5 Ilma-alusten jättöpyörteet

Toimeksiantavassa yrityksessä pidettiin palaveri opinnäytetyön, sekä jatkokehityksen kannalta olennaisten infraäänilähteiden valitsemiseksi tutkimukseen. Lyhyen harkinnan jälkeen päätettiin opinnäytetyössä edetä tutkimusten osalta ilma-alusten jättöpyörteiden käytännön mittauksilla. Ennen mittauksia oli tärkeää perehtyä jo olemassa olevaan teoriaan pyörteiden osalta.

Jättöpyörteet ovat tiettyjä alueita yleensä lentokenttien yhteydessä, joille on tunnusomaista voimakkaat ilmassojen pyörimisliikkeet. Ne luovat vahvan virtausnopeuskentän, joka saattaa aiheuttaa ilma-aluksen kohtaamisen seurauksena vakavia tilanteita, kuten lentokoneen äkkinäisiä ja tahattomia alas- tai ylöspäin suuntautuneita kaltevuudenmuutoksia tai pyörimisliikkeitä. Lentoliikenteen ohjaajat määrittävät aina vähimmäisetäisyyden ja aikavälin, joka peräkkäin kulkevilla ilma-aluksilla saa olla nousuissa ja laskuissa (ks.kuvio 8, s. 22). Vaikka alusten välit takaavat turvallisen liikenteen, niillä on kuitenkin heikentävä vaikutus lentokenttien kapasiteettiin, joka tulee ottaa huomioon, kun suuresti liikennöidyllä lentokentällä olisi kasvun tarvetta.

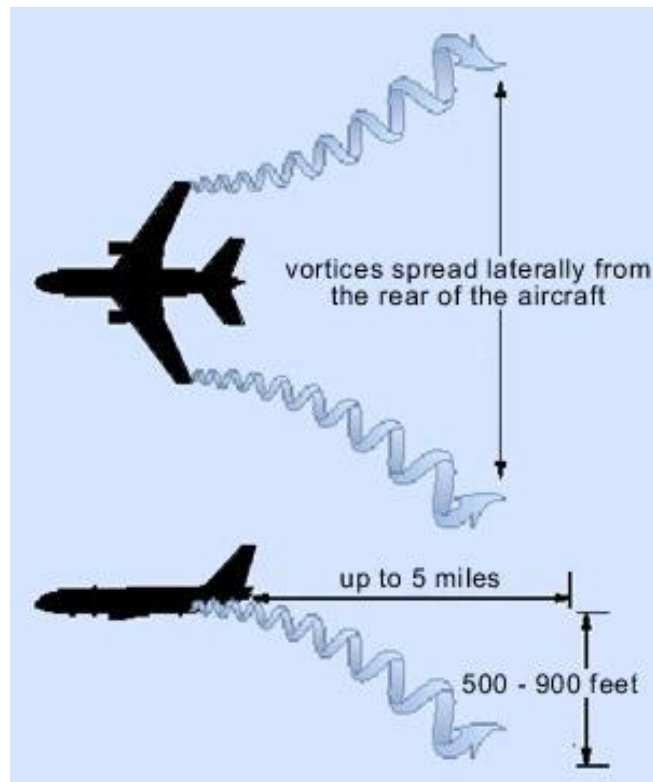
Jättöpyörre on siis käytännössä turbulenssia, joka muodostuu lentokoneen takana sen halkoessa ympäröivää ilmaa. Tämä turbulenssi muodostuu useista komponenteista,

joista tärkeimmät ovat lentokoneen siiven kärjen pyörteet sekä suihkumoottorin ilmapvirtaus. Suihkumoottorin ilmapvirtaus on suurella nopeudella virtaavaa kaasua, joka on äärimmäisen turbulenttista, mutta joka kestää vain hetken. Siiven kärjen pyörteet taas ovat paljon vakaampia, ja ne voivat säilyä syntymisalueellaan jopa useita minuutteja. (AFSOC Crash Report Faults Understanding Of Osprey Rotor Wake, 2014)

Leading aircraft	Following aircraft	Separation time arriving	Separation time departing
Heavy	Medium	2 mins	2*mins
Heavy	Light	3 mins	2*mins
Medium	Light	3 mins	2*mins

Kuvio 8 Jättöpyörteiden varo-ajat (AFSOC Crash Report Faults Understanding Of Osprey Rotor Wake, 2014)

Siiven kärjen pyörteet muodostuvat kun siipi synnyttää nostoa lentokoneelle. Siiven alapuolinen ilma vedetään yläpuolisen matalan ilmanpaineen voimasta siiven kärjen ympäri siiven päälliselle alueelle, joka synnyttää pyörrevanan molemmista koneen siiven kärjistä (ks. kuvio 9, s. 23). Jättöpyörteet sijaitsevat tässä pyörrevirrassa siiven takana. Jättöpyörteiden voimakkuus riippuu ensisijaisesti koneen painosta ja nopeudesta. Siiven kärjen pyörteet synnyttävät siis suurimman ja vaarallisimman komponentin jättöpyörteistä (Pilot and air traffic controller guide to wake turbulence, 2014).



Kuvio 9 Lentokoneen jättöpyörteet (aviationexplorer.com, 2014)

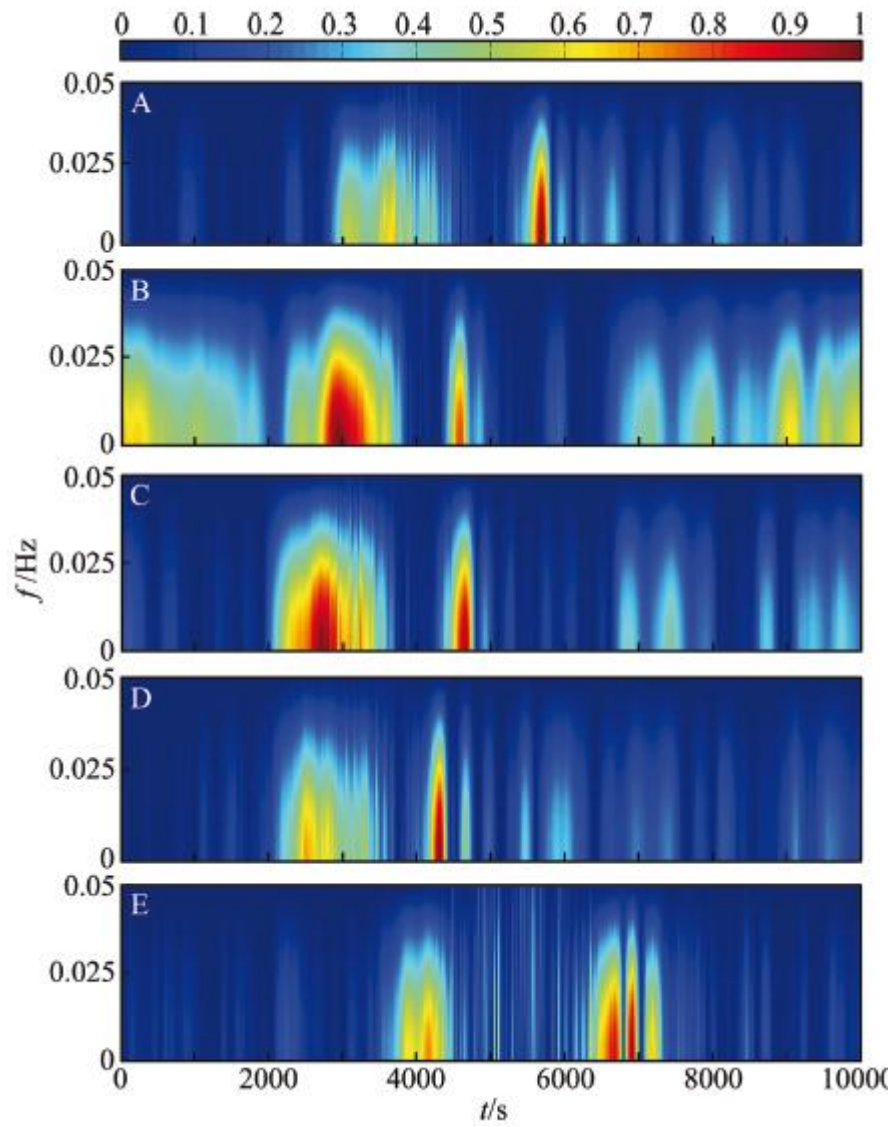
Jättöpyörteet voidaan myös kuulla maantasossa. Tyynenä päivänä raskaiden suihkukoneiden jättöpyörteet aiheuttavat ihmisen kuuloalueen sisäpuolisia ääniä, kuten vaimoa pauhua tai vihellystä. Tämä on pyörteen vahvan ytimen aiheuttamaa melua. Jos lentokone synnyttää heikompa jättöpyörrettä, voi se kuulostaa samalta kuin paperia revittäisiin. Usein se huomataan vasta muutamien sekuntien kuluttua lentokoneen yleisen suoran äänen vaimettua. Tällöin pyörteen ääni voimistuu. Jättöpyörteen ääni on helposti havaittavissa, koska se kulkee yllättävän kaukana lentokoneen jäljessä.

Monia anturitekniologioita on jo kokeiltu jättöpyörteiden tutkimiseen viimeisen 35 vuoden aikana, mukaan lukien mikroaalto- ja millimetriaaltotutkaa, radioakustista äänilaitetta (RASS), akustista kaukokartoituslaitetta (Sodar), optista kaukokartoituslaitetta (Lidar) sekä anemometri pohjaisia maatuulilinjoja. Yksikään yllä mainittu laite ei kuitenkaan täytä pyörteiden mittaamiseen vaadittavia kriteerejä, joita ovat pyörteen tunnistamisen herkkyys, pyörteen seurantaominaisuus, säänkestävyys, automatisoitu ja reaaliaikainen mittaus, lentoaseman turvallisuuteen liittyvät rajoitukset ja kustan-

nukset. Edellä luetelluista antureista Lidar on osoittautunut erityisen vankaksi havaitsemaan jättöpyörteitä kirkkaalla säällä ja kevyessä vesi- tai lumisateessa. RASSin on huomattu täyttävän kaikkien muiden kriteerien osalta, mutta ei kustannusten. Tuloksena huomataan, että aihealueella on jatkuva kiinnostus uusille jättöpyörteiden tutkimiseen tarkoitetuille anturitekniologioille. (Rubin, 2005)

3.6 Maanjäristyksiä edeltävät infraääniaallot

Maanjäristyksistä on jo paljon tutkittua tietoa, mutta vain itse järjestyksistä ja niiden jälkiseurauksista. Vielä tiedetään erittäin vähän infraäänistä, joita syntyy ennen pääjärjitystä. Kiinan Pekingissä suoritettiin mittauksia vuonna 2011 neljän päivän ajan ennen pientä maanjäristystä. Mittausasemia oli viisi kappaletta, joiden avulla tutkijat saivat kolmiolaskennalla kohdistettua maanjäristyksen lähdepisteen maankuoressa. He mittasivat infraäänien taajuudeksi suurimmaksi osaksi alle 0.025 hertsiä (ks. kuvio 10, s. 25). Järjityksen episentrumin ja lähteen väliseksi etäisyydeksi he kuvastivat noin 5km. Tutkimus osoitti, että matalataajuuksisia infraääniä voi esiintyä ennen maanjäristystä. Siksi olisi tärkeää saada lisää tutkimustietoa aiheesta, sillä ennakkovaroitusjärjestelmä maanjäristysten varalta olisi tulevaisuudessa henkiä pelastava keksintö. (LÜ ym., 2014)

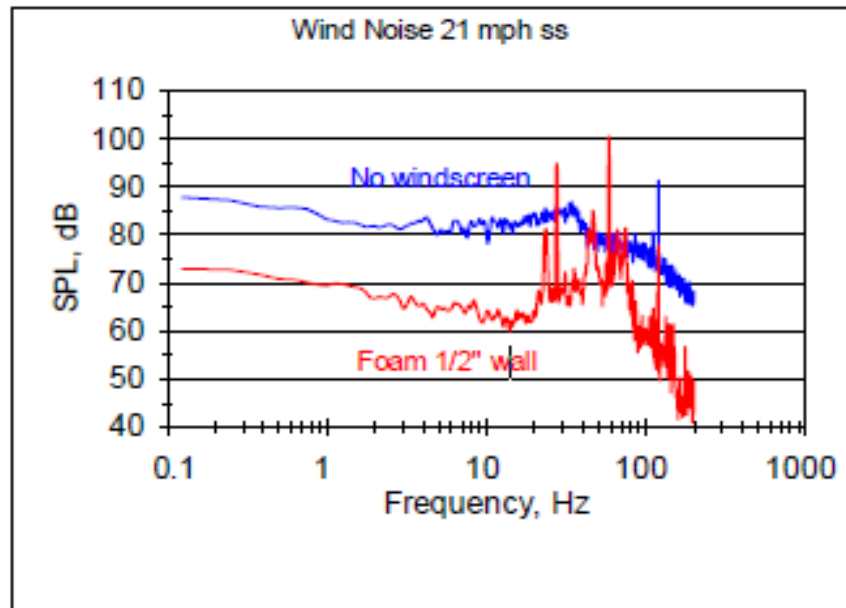


Kuvio 10 Viiden havainnointiaseman infraäänien spektrogrammit (LÜ ym., 2014)

4 EMFI-ANTURIN VALMISTUS JA KOTELOINTI

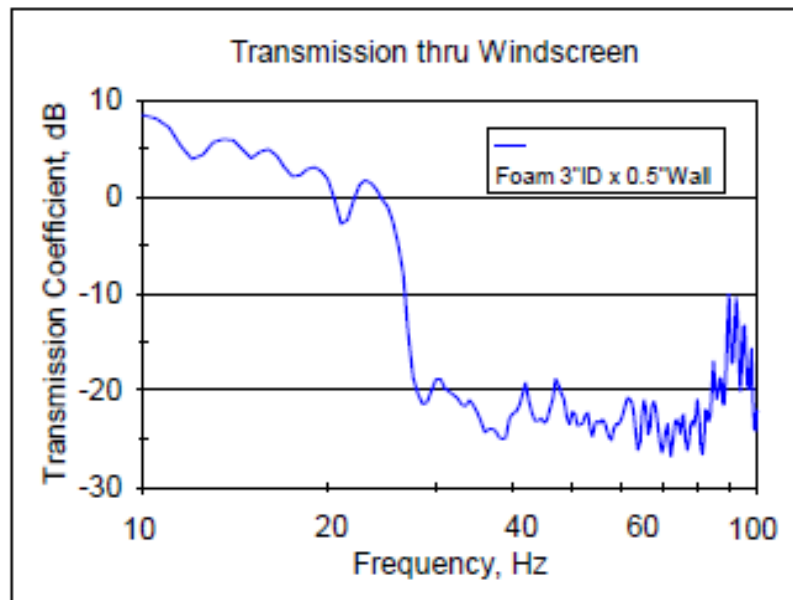
4.1 Taustatietoa kotelointiin

Vuosien 2005 ja 2008 välisenä aikana NASA:n Langley'n osasto suunnitteli ja kehitti siirrettävän infraäänien monitorointilaitteiston, jolla voidaan tehdä mittauksia paikoissa, joihin ei aikaisemmillä laitteistoilla päästy. Laitteisto koostuu elektreettikondensaattorimikrofonista, jossa on kolmen tuuman anturiosa, pieni ja kompakti tuulilasi sekä korkean impedanssin esivahvistin. Koska infraäänillä on korkea materiaalin läpäisykerroin, tuulilasi on tehty materiaalista, jossa on pieni akustinen impedanssi ja joka on jätetty riittävän paksuksi, jotta rakenne olisi riittävän tukeva. Tiheäsoluisen polyuretaanivaahdon huomattiin olevan tähän tarpeeksi soveltuva. NASA:n laite tehtiin liikuteltavaksi, mutta se oli myös mahdollista asentaa kiinteästi maahan. Tätä varten he tekivät tuulilasista laatikon mallisen, jotta sen voisi upottaa maahan kannen ollessa maan tasolla. He mittasivat laitteistolla muun muassa äänivallien rikkoontumisia, helikoptereiden synnyttämiä ääniaaltoja, avaruussukkuloiden laukaisuääniä Kennedyn Avaruuskeskuksessa sekä ihmisen liikehdintää huoneessa. (Shams ym., 2008) Kuviosta 11 (s. 27) nähdään kuinka polyuretaanituulilasi alkaa resonoimaan yli 10 hertsin taajuuksilla. Kuviosta 12 (s. 27) huomataan kuinka yli 20 hertsin äänet vaimenevat lävistäessään kyseisen tuulilasin.



(a)

Kuvio 11 Testien perusteella tehty kuvaaja, kun on mitattu infraääniä ilman kotelointia ja koteloinnin kanssa. Korkeammat taajuudet alkavat resonoimaan yli 10Hz kohdalla. (Shams, 2008)



(b)

Kuvio 12 Testien perusteella tehty kuvaaja, jossa on testattu äänen läpikulkeutuvuutta polyuretaanituulilasin läpi. (Shams, 2008)

4.2 Emfi-antureiden valmistaminen infraäänimittauksia varten

Tämän työn ensimmäinen käytännön työnsarka löytyi anturin valjastamisesta infraäänien havainnointiin. Tarkoituksena oli saada tehtyä mahdollisimman pitkälle häiriötön, mutta samalla riittävän herkkä anturi. Anturi tuli saada suljettua tiiviiseen tilaan, joka päästäisi kuitenkin matalataajuiset värähtelyt läpi. Tätä varten tutkittiin anturin kapasitiivisia ominaisuuksia sekä kartoitettiin erilaisia materiaaleja, jotka soveltuisivat kyseiseen tehtävään. Koska mittaaminen perustuu käytännössä ilmanpaineen vaihteluiden mittaamiseen, tulee ylimääräiset taajuudet saada jäämään laatikon ulkopuolelle. Matalilla taajuuksilla anturi ei pääse haitallisesti resonoimaan, mutta voimakkaiden korkeiden taajuuksien siirtyminen anturille haittaisi sen toimintaa merkittävästi.

Jättöpyörteiden syntyessä molempien siipien taakse tulee myös mittauspisteitä olla kaksi kiitoradan ja nousevan lentokoneen molemmilla puolilla. Tämä tarkoittaa sitä, että anturiyksiköjä tuli tehdä kaksi kappaletta. Jotta mittauksista saataisiin kitkettyä myös epävarmuustekijöitä pois, päätettiin antureista tehdä hieman erilaisia, sillä pyörteiden ollessa lähestulkoon identtisiä molempia siipien jälkeen, voidaan antureiden synnyttämästä tiedosta päätellä enemmän, kun ne eivät ole aivan identtisiä. Ideaalinen tilanne olisi todennäköisesti useiden mittauspisteiden asentaminen kiitoradalle, mutta se vaatisi lisää sekä materiaali- että aikaresursseja, kuten myös ekstensiivistä tutkimusta.

Emfi-antureiden käytöstä infraäänien ympäriltä ei vielä löydy tutkimustietoa. Tämän vuoksi anturien koko tuli määrittää yrityksen sisäisten tietojen pohjalta. Anturin kapasitanssi määräytyy hyvin pitkälle sen koon mukaan ja mitä suurempi anturi on, sitä voimakkaampi signaali siitä saadaan ulos. Tätä voidaan myös vahvistaa kytkemällä useampia antureita rinnan. Koska EMFi-kalvon paksuutta - ja sen myötä myös herkkyyttä - voidaan valmistuksen aikana säätää halutunlaiseksi, on antureista mahdollista tehdä myös hyvin pitkälti identtisiä. Ideaalisen paksuuden ja herkkyyden määrittäminen vaatisi kuitenkin pidempää tutkimusta, eikä siihen tässä opinnäytetyössä paneuduttu.

Yhden 300 neliösenttimetrin kokoisen anturin tunnettu kapasitanssi on normaalisti noin 0.012 mikrofaradia. Vaikka tämänkin kokoinen anturi toimisi jo mikrofonin tavoin,

työssä päätettiin kuitenkin käyttää paljon suuremman kapasitanssin omaavia antureita. Anturit leikattiin noin 600 millimetriä leveästä anturirullasta. Rullan toimivat anturialueet ovat puolitettu, jolloin anturissa on aktiivista osaa noin 290 millimetriä keskileikkauksen molemmin puolin. Jokainen yksittäinen aktiivinen osa on noin 600 millimetriä pitkä, jonka päässä on yksi liitäntäalue. Anturit leikattiin siten, että yksittäiset kappaleet ovat 600 millimetriä leveitä ja 600 millimetriä pitkiä, jolloin yksi kappale koostuu kahdesta aktiivisesta alueesta. Nämä alueet kytkettiin yhteen rinnankytkennällä. Tällöin yhden anturikappaleen kokonaiskapasitanssiksi tuli noin 0,14 mikrofaradia, ja pinta-alaksi noin 0,36 neliometriä.

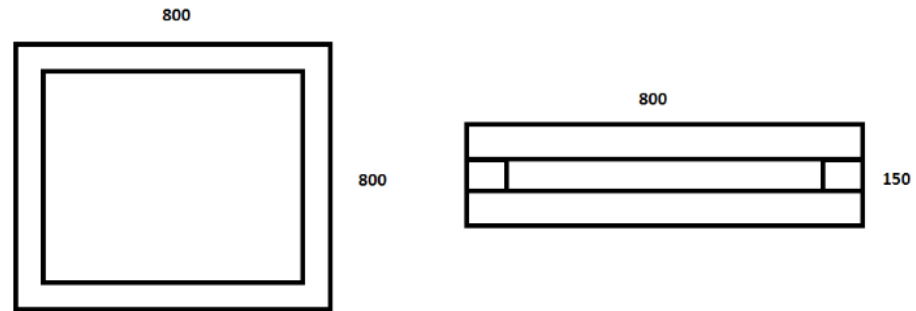
Ensimmäisessä anturiyksikössä päätettiin käyttää yhtä 600mm x 600mm anturikappaletta. Toisessa anturiyksikössä käytettiin kolmea saman kokoista anturikappaletta, jossa jokainen anturikappale kytkettiin yhteen rinnan ja liimattiin päällekkäin kaksikomponenttiliimalla. Liimaus tehtiin siten, että antureiden väli jäi mahdollisimman pieneksi, jonka myötä myös liimakerroksesta tuli ohut. Tämä saavutettiin painamalla voimakkaasti ylimääräinen liima antureiden välistä tavallisella liimatelalla. Näin saatiin toisen anturiyksikön kokonaiskapasitanssiksi n. 0,42 mikrofaradia.

4.3 Anturin kotelointi

Anturiyksikön saaminen mahdollisimman häiriöresistentiksi ja tiiviiksi vaati, että sille suunniteltiin ja rakennettiin kotelorakenne. Tärkeimpänä vaatimuksena voitiin pitää anturin pinnan suojaamista kosteudelta, joka aiheuttaisi ylimääräisiä värähtelyjä signaalissa. Seuraava ongelma oli, miten anturin saa niin tiiviiksi, ettei sen kehikko evää matalien taajuuksien välitystä anturille.

Kehikon materiaaliksi valittiin polyuretaanieriste, jota käytetään muun muassa betonielementtien teollisessa valmistuksessa. Polyuretaani on polymeeri, jota muodostuu reaktiossa isosyanaatin ja polyolin kesken. Muodostuneen polyuretaanin ominaisuudet vaihtelevat valitun isosyanaatin ja polyolin mukaan. Se on 50mm paksua polyuretaanisolumuovia, jota ei ole kuluttajamyynnissä. EFR-polyuretaanieristeen pinnoitteena on diffuusiotiivis alumiinilaminaatti, joka on suojattu usealla pintakerroksella.

Näin kuorivalu ei pääse kosketuksiin laminaatin alumiinikerroksen kanssa. EFR-eristeitä käytetään usein myös saunojen ja P1-paloluokan kerrostaloissa, sillä palotilanteessa se hiiltyy, mikä estää palon leviämisen. Se on myös erittäin kosteudensietokykyinen, sillä siihen vaikuttava kosteus ei vahingoita sen rakennetta tai vaikuta sen ominaisuuksiin (SPU-eristeet 2014).



Kuvio 13 Anturilaatikon mitat

Polyuretaanilevystä rakennettiin kolmikerroksinen kotelo. Kotelo koostui kahdesta 800*800mm kansipalasta (ks. kuvio 13), sekä neljästä 70mm paksusta ja 730mm pitkästä suikaleesta, jotka liimattiin kiertämään kansia niiden välissä. Näin sisälle saatiin 50mm korkuinen tyhjä tila, jonka pohjaan anturit liimattiin (ks. kuvio 14, s. 31). Kotelon sivulle tehtiin vielä läpivientireikä anturin signaalikaapelille.



Kuvio 14 Anturin sovitus laatikon pohjalle

Jokainen kotelon sauma tiivistettiin Sikaflexin 221, 1-komponentti polyuretaanitiivistemassalla, joka kovettuu ilmankosteudesta ja muodostaa kestävästä elastomeeristä. Tiivistemassan valintaan vaikutti myös sen sään-, ikääntymisen- ja liimauksensietokyky. Tämän jälkeen kotelon sivupinnat peitettiin alumiiniteipillä, samanlaisella kestävyttä lisäävällä lasikuitusäikeistetyllä teipillä kuin mitä saunojen tiivistyksissä monesti käytetään. Sen pinnalla on synteettinen kumiliima, joka tarttuu hyvin sekä itseensä että polyuretaaniin. Näin saatiin myös EFR-levyn pinnoittamattomat sivut säänkestäviksi.

4.4 Kaapelointi ja sijoittaminen kentälle

Opinnäytetyön mittauksia varten saatiin esivahvistimelle suunniteltu salkku yrityksen puolesta. Salkku on riittävän iso jotta sinne mahtuu sisälle sekä 12 voltin virtalähdeakku, sekä esivahvistin. Molemmat ruuvattiin kiinni salkkuun niiden heilumisen minimoimiseksi. Salkkuun mahtuu sisälle myös kannettava tietokone, jolloin akulta saadaan virtaa sekä tietokoneelle, että esivahvistimelle.

Anturilaatikon ollessa yksikkö, ei siitä lähde kuin yksi signaalikaapeli esivahvistimelle. Käytännön mittauksissa tämä tarkoittaa sitä, että kun anturiyksiköitä on kaksi, tulee kaapelikeloja myös olla kaksi. Kaapeliksi valittiin vahvistettu stereokaapeli, jolle jätettiin leikkauksen jälkeen pituutta noin 20 metriä. Kaapeli oli sekä hankauksen, että

säänkestävää, sillä mittaukset suoritettaisiin huoltamattomalla alueella parin viikon ajan, jolloin heikompi kaapeli halkeilisi helposti sääolojen muuttuessa. Riittävä pituus mahdollistaa sekä anturiyksikön että esivahvistimen asianmukaisen sijoituksen kentälle.

Anturilaatikat tulisi tulevaisuudessa sijoittaa kiitoradan pätyyn heti lentokoneen nousuradan alapuolelle maantasoon. Laatikoille kaivettaisiin sopivat kuopat, jolloin laatikot saadaan asettumaan tukevasti maanpintaan, puolet laatikosta jääden kumminkin maanpinnan yläpuolelle. Pienellä laatikoiden upottamisella pyritään minimoimaan myös tuulen vaikutusta suoraan kalvoon, jolloin kohina signaalissa vähenee. Samanlainen sijoittelu pätee myös mitattaessa maanpinnalla kulkevia infraääniä, kuten maanjäristysten esiääniä. Tällöin voidaan laatikko kuitenkin upottaa maahan ja peitellä kauttaaltaan häiriöiden minimoimiseksi.

5 SIGNAALINKÄSITTELY

5.1 Analoginen ja digitaalinen signaalinkäsittely

Signaalinkäsittely on mahdollistava teknologia, joka kattaa perusteorian, sovellukset, algoritmit ja toteutuksen prosessoinnista tai tiedon siirtämisestä monissa eri fyysisissä, symbolisissa, tai abstrakteissa formaateissa. Sitä hyödynnetään usein signaalina matemaattisissa, tilastollisissa, laskennallisissa, heuristisissa ja kielellisissä esityksissä, formalismeissa ja esiintymistekniikoissa, mallintamisessa, analyyseissä, synteeseissä, löydöissä, antureissa, hankinnoissa, oppimisessa, turvallisuudessa ja oikeusopissa.

Analoginen signaalinkäsittely on signaaleille joita ei ole digisoitu, kuten radioissa, vanhoissa puhelimissa, tutkissa ja vanhemmissa televisioissa. Analoginen laite edellyttää lineaarisia ja epälineaarisia elektronisia piirejä. Edeltävät ovat esimerkiksi passiivisia ja aktiivisia suodattimia, lisämiksereitä, integraattoreita ja viivelinjoja. Epälineaariset piirit sisältävät compandoreita, multiplikaattoreita, jännite-ohjattuja filttoreita ja oskillaattoreita, sekä vaihe-lukittuja silmukoita.

Digitaalinen signaalinkäsittely on digitaalisoidun diskreettiajan signaalinäytteen prosessointia. Prosessointi tapahtuu yleiskäyttöisillä tietokoneilla tai digitaalisilla piireillä, kuten ASIC:lla, kenttäporttimatriiseilla tai erikoistuneilla digitaalisen signaalin prosessoreilla. Tyypilliset aritmeettiset operaatiot ovat kiinteän luvun ja liukuluvun, reaaliarvon ja kompleksiarvon multiplikaatioita ja lisäyksiä. Muita tyypillisiä laitteistojen toimintoja ovat pyöreä puskurointi ja hakutaulukot. Esimerkkeinä voidaan pitää Fast Fourier- muunnoksia (FFT), äärellisiä impulssivasteellisia (IIR) filttereitä sekä mukautuvia suodattimia, kuten Wiener ja Kalman-suotimia. (Huttunen, 2003)

5.2 Esivahvistinelektronikka

Jotta anturista saatava signaali olisi toivotunlainen, täytyi sille tehdä varta vasten oma analogivahvistin suodattimiseen. Vahvistimelta tuli saada signaali mahdollisimman puhtaana digitaalimuuntimen läpi signaalinkäsittelyyn ja taulukointiin sitä varten valmistetulle tietokone-ohjelmalle.

Esivahvistimella vahvistetaan yleensä muun muassa mikrofoniin heikkoa signaalia linjataseiseksi päätevahvistimelle. Käytännössä tämä tarkoittaa jännitteen vahvistamista, eivätkä esivahvistimet yleensä voi syöttää suurta sähkötehoa. Rakenteeltaan ne voivat olla pienehköjä, koska ne eivät juurikaan kuluta tehoa, jolloin myös muuntaja voi olla pienikokoinen. Hukkalämpöä ei myöskään muodostu läheskään niin paljon kuin päätevahvistimissa, joten esivahvistin ei tarvitse yleensä erillisiä jäähdytysrakenteita. Elektronisesti esivahvistimen voi toteuttaa vaikka jo muutamalla transistorilla tai operaatiovahvistimella. Esivahvistin sijoitetaan yleensä lähelle anturia, jotta saadaan vähennettyä melua ja häiriöitä. (Preamplifier.org, 2014)

5.3 Infraäänimittauksiin valjastettu varausvahvistin

Opinnäytetyössä käytettiin yleisesti kapasitiivisten antureiden yhteydessä vallitsevaa kytkentää (ks. kuvio 15, s. 34), jota kutsutaan varausvahvistimeksi. Tässä normaalin jännitevahvistimen sijaan takaisinkytkentä tapahtuu pääsääntöisesti kapasitiivisesti kondensaattorin C avulla, jolloin varaus Q tai sen muutos anturissa saadaan muutettua suorassa suhteessa jännitteeksi kaavan 3 mukaan.

Kaava 3:

$$\Delta U = \frac{\Delta Q}{C}$$

jossa

- U on jännitevahvistus (V, voltti)
- Q on varaus (C, coulombi)
- C on kapasitanssi (F, faradi)

Reaalisessa varausvahvistimessa alarajataajuus on aina rajoitettu ja riippuu takaisinkytkentävastuksen R sekä -kondensaattorin C arvoista kaavalla 4.

Kaava 4:

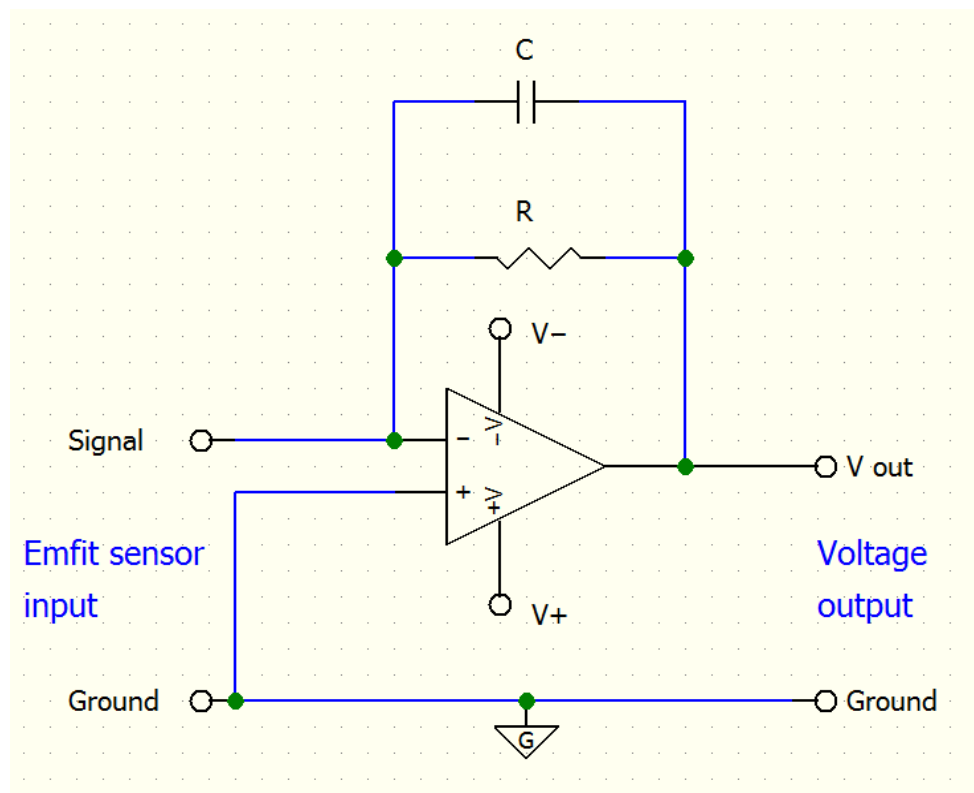
$$f = \frac{1}{(2 * \pi * R * C)}$$

jossa

- R on resistanssi (Ω , ohmi)

Alarajataajuuden rajallisuudesta seuraa, että reaali vahvistin ei voi toistaa taajuuksia miten alas tahansa, vaan aikavakio rajoittuu n. 100 - 1000 sekunnin väliin. Toisin sanoen alarajataajuus on käytännössä välillä 0,2 - 2 millihertsiä (0.0002-0.002 hertsiä). Opinnäytetyössä käytetty n. 1,6 millihertsiä (0.0016 hertsiä) alarajataajuus on kuitenkin riittävä useimpiin sovelluksiin ja soveltuu parhaimmillaan jopa maanjäristysanturin esivahvistimeksi.

Sama rajoitus olisi myös jännitevahvistimen myötä käytettäessä kapasitiivista anturia. Varausvahvistimen etuna on muun muassa se, ettei anturikaapelin pituus vaikuta mitattavan signaalin tasoon. Kaapelin pituus vaikuttaa anturin kapasitanssiin ja sitä kautta jänniteherkkyyteen, mutta varausvahvistimessa tätä ongelmaa ei ole.



Kuvio 15 Varausvahvistimen periaatekuva (Emfit Oy 2015)

5.4 Labview-ohjelmointi

Labview on National Instrumentsin tekemä ohjelmointiympäristö, joka perustuu graafiseen G-kieleen. Siitä on saatavissa versiot Windowsiin, Linuxiin, Mac:iin, Solarikseen ja joillekin PDA-laitteille. Labview-ohjelmat ovat suoraan siirrettäviä eri käyttöjärjestelmien välillä, pois lukien tietyt käyttöjärjestelmäkohtaiset rajoitukset kuten ActiveX-komponentit. Muut erot, esimerkiksi erilaiset tiedostopolut voidaan sovittaa käsin (omat ini-tiedostot) tai ohjelmallisesti tunnistamalla ajossa oleva käyttöjärjestelmä.

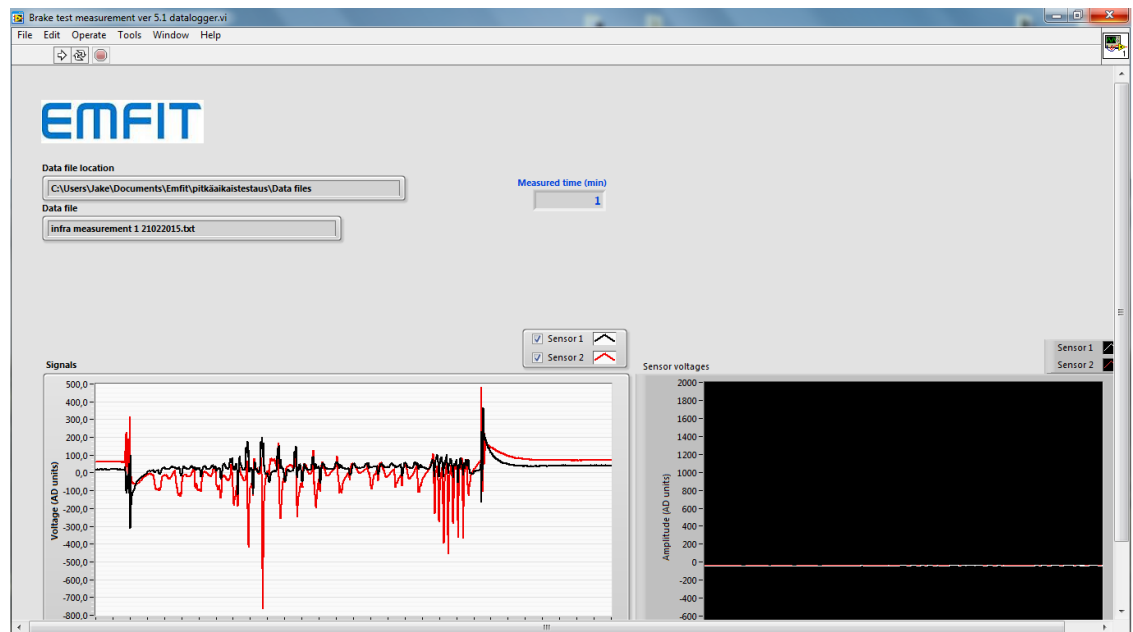
Labview on lähes *de-facto* standardi mittaus- ja testaussovelluksissa, mutta kypsyytensä ja helppokäyttöisyytensä ansiosta se soveltuu usein myös yleisohjelmointikieleksi. Joitain operaatioita sillä on kuitenkin verrattain työlästä tehdä, kuten tietojen taulukoinnit ja yhdistäminen muihin sovelluksiin. Myös hajautustaulujen toteuttaminen Labviewillä on vaikeaa, eikä siinä ole vastaavaa sisäänrakennettuna. OpenGL on kuitenkin tuottanut joitain Labview-laajennuksia.

Tyypillisiä muita kohteita ovat muun muassa PC-pohjaiset teollisuusautomaatiosovellukset ja hyvinkin laajat ja hajautetut tiedon varastointi ja analysointisovellukset. Tehokkuutensa vuoksi se kilpailee täysin esimerkiksi C/C++-ohjelmoinnin kanssa. Uusimmat versiot ovat tyypillisesti nopeampia kuin vanhat. (National Instruments data acquisition brochure, 2014)

Varsinainen infraäänien mittausohjelmisto tehtiin tämän projektin vaatimuksien mukaan, mutta kuitenkin siten, että se täyttää vain minimivaatimukset. Ohjelma on tehty Labview-alustalla, joten se on rakenteeltaan yksinkertainen ja helppokäyttöinen. Ohjelman ollessa valmistettu Labview alustalle, datan tallentaminen onnistuu helposti Notepad-muotoon lukusarjoiksi (ks. kuvio 17, s. 38). Data voidaan myös logata suoraan esimerkiksi Excel taulukkomuotoon, jolloin siitä on helppo tulkita mittaustuloksia sekä rakentaa kuvaajia haluttuun muotoon. Ohjelma merkkää myös automaattisesti tarkan mittauskohtaisen kellonajan. Mittausaika voidaan myös säätää minuutin tarkkuudella, niin pitkäksi kuin vain halutaan. Tässä tulee kuitenkin vastaan tallennustilan koko pitkäkestoisilla mittauksilla, sillä jo kahden anturin yhtäjaksoiset 60 minuutin pituiset mittaukset vievät tallennustilaa melkein 10 megabitin verran. Tämä tarkoittaisi sitä,

että viikon ajan mitattuna mittaustulokset veisivät kovalevytilaa järjestelmältä noin 1,5 gigatavua.

Mittausta aloitettaessa ohjelmalle annetaan alkuarvoina mittauksen nimi, numero sekä mittausajan pituus. Ohjelma tallentaa tiedot automaattisesti alikansioon omaan hakemistoonsa näillä annetuilla tunnisteilla. Mittauksen käynnistyttyä voidaan signaaleja tarkastella reaaliajassa. Kuvioista 16 nähdään, kuinka vasemmalle mittauksen jälkeen on piirretty minuutin aikana saadut signaalit molemmista antureista, sekä oikealla oltaisiin mittauksen aikana voitu tarkastella viiden sekunnin ajalta reaaliaikaista signaalien käyttäytymistä.



Kuvio 16 Dataloggerin käyttöliittymä

Mittauksiin tehty ohjelma onkin siis vain ja ainoastaan dataloggaukseen perustuva ohjelma. Sen mittaustaajuus on tässä tapauksessa asetettu 100 hertsiin, joka takaa riittävän tarkkuuden mittauksissa. Toisin sanoen, ohjelma rekisteröi päällä ollessaan sekunnin aikana 100 pistettä, mikä tarkoittaa 6000 mittausta minuutissa.

Kuvio 17 Notepadeihin tallentuneet lukusarjat

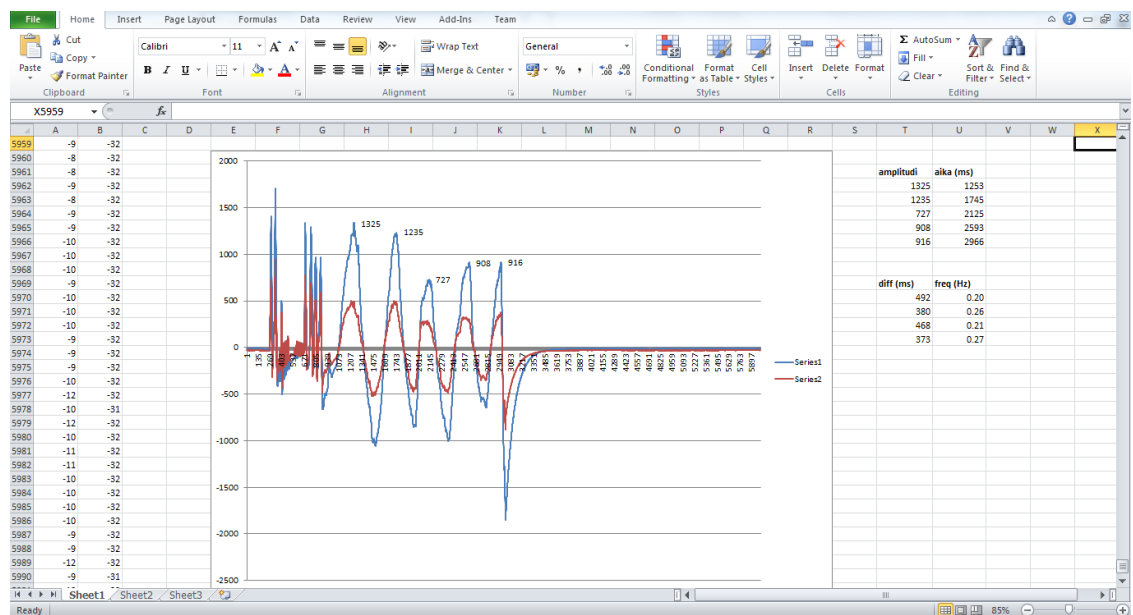
6 KÄYTÄNNÖN MITTAUKSET

6.1 Laitteiston testimittaukset

Projektin ensimmäiset mittaukset suoritettiin Emfit Oy:n tiloissa Vaajakoskella ja ne olivat lähinnä testaukseen liittyviä mittauksia. Mittaukset olivat yksinkertaisia ja nopeita suorittaa ja niillä saatiin nopeasti paljon tietoa. Mittaukset suoritettiin siten että laatikot aseteltiin tasaiselle alustalle päällekkäin ja esivahvistinelektroniikan sisältävä säänkestävä salkku antureiden vierelle stereokaapelilla yhdistettynä. Dataloggerilla varustettu kannettava tietokone pidettiin RJ45-kaapelin päässä viereisellä työpöydällä.

Sisätiloissa ei tavallisesti esiinny infraääniä, ellei lähistöllä ole suuria työkoneita tai muita infraääniä tuottavia laitteita. Tämän vuoksi antureille piti tuottaa ilmanpainevaihteluita pitkissä sykleissä. Tämä saatiin toteutettua heiluttelemalla eri huoneiden välisiä ovia, jolloin saatiin kokeiltua muun muassa etäisyyden vaikutusta anturin toimintaan. Toisena keinona kokeiltiin heiluttelemalla toisen anturin kantta antureiden päällä ensin nopeasti ja hiljalleen vauhtia hidastamalla kunnes päästiin usean sekunnin sykleihin signaalipiikeissä.

Mittaukset suoritettiin useissa yhden minuutin pituisissa testipätkissä, joiden avulla saatiin selville kuinka signaali käyttäytyy vahvistimen aikavakiota säädettäessä. Vahvistimen alarajataajuutta säädettiin vaihtelemalla varausvahvistimen takaisinkytkentävastuksien kokoa, ulottuen 100 kilo-ohmin vastuksista jopa 10 megaohmin vastuksiin. Testien perusteella voitiin asettaa alarajataajuus n. 0.002 hertsiin isojen 10 megaohmin vastusten avulla, sillä näin ei signaalia tarvinnut vahvistaa yli sen sietokyvyn joka on A/D muuntimille mentäessä yleensä 5 voltia.



Kuvio 18 Testitulokset Excel-taulukossa

6.2 Mittaukset Saksassa

Maanjäristyksen esiääniä tutkittiin Emfit Oy:n työntekijän toimesta Saksassa, koska Suomessa maanjäristykset ovat joko liian harvinaisia tai liian pieniä, joten niiden tutkiminen olisi ollut tässä tapauksessa mahdotonta.

Tämä testaus suoritettiin Saksassa, lähellä Frankfurtin lentoasemaa. Asema on Euroopan kolmanneksi suurin, joten siltä alueelta lähtevät lentokoneiden äänet ja muu melu ulottuvat pitkälle. Testauksen tarkoituksena oli erotella maaperän infraäänet ja

tuulen sekä lentoaseman tuottamat äänet toisistaan, joka toi suuria epävarmuustekijöitä ja haasteita mittauksiin. Anturiyksikkö kaivettiin maahan siten, että sen päälle saatiin kasattua n. 5cm maata. Mittauksissa käytettiin anturiyksikköä, jossa oli yhdeksän anturia rinnan kytkettynä. Näin taattiin anturin herkkyys ja sitä myötä signaalin vahvuus. Ensimmäinen mittaus suoritettiin viikonloppuna yhden vuorokauden aikana alkaen lauantaina hieman ennen keskipäivää. Mittauksessa käytettiin 25 hertsin näytetaajuutta, ja siitä muodostettiin spektrogrammikuva (ks. Liite 1).

7 TULOKSET

7.1 Prototyyppilaitteisto

Projektin päätavoitteena oli prototyyppilaitteiston valmistaminen ja matalataajuuksisten signaalien havainnointi. Tuotekehitystyön lopputulemaksi opinnäytetyössä valmistettiin infraääntä pitkällä aikavälillä mittaava ja tallentava laitteisto ja tässä tapauksessa etsittiin ratkaisua muun muassa lentokoneiden jättöpyörteiden voimakkuuden mittaamiseen. Laitteisto soveltuu myös muiden infraäänilähteiden tuottamien taajuuksien mittaamiseen, kuten maanjäristysten esiäänien havainnointiin ennen varsinaista järistystä.

Laitteistossa on kaksi, L-tyyppin EMFI-antureilla varustettua, koteloitua 0,64 neliömetrin kokoista polyuretaanilaatikkoa. Anturilaatikot ovat kytkettyinä stereokaapeleilla säänkestävään salkkuun, jossa on sisällä sekä 12 voltin akku että 12-paikkainen varausvahvistinelektronikka. Kortilta on lähtöporttina RJ-45 Ethernet kaapelille liitin, jonka kautta saadaan signaalit välitettyä salkun sisälle mahtuvalle kannettavalle tietokoneelle. Akku kestää täyteen ladattuna käytössä noin yhden vuorokauden, jos siihen on liitettyä sekä tietokone että varausvahvistin. Luvussa 4.4 selvitetään, kuinka anturilaatikot ja salkku on sijoitettava kentälle. Laitteisto ja ohjelmisto ovat selkeitä ja help-

pokäyttöisiä jopa henkilölle jolla ei aiempaa kokemusta aiheesta ole. Tulosten analysointi vaatisi kuitenkin vielä tässä vaiheessa kokeneempaa henkilöä, joten asiakaskäyttöön ei laitetta voisi vielä soveltaa.

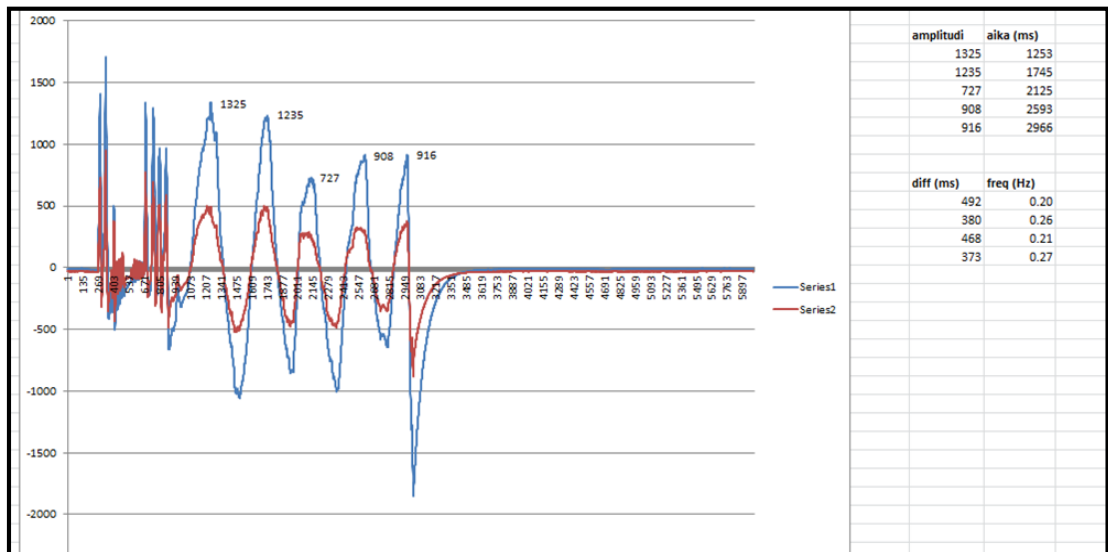
Itse anturilaitteiston lisäksi sille valmistettiin sopiva ohjelmisto. Tämä toteutettiin graafisella g-kielellä toimivalla Labview-ohjelmointiohjelmalla. Ohjelmiston tehtävänä oli tallentaa varausvahvistimelta saadut signaalitiedot jatkokäsittelyä varten. Ohjelmiston käyttöliittymästä itsestään tehtiin niin yksinkertainen kuin vain oli mahdollista (ks. kuvio 16).



Kuvio 19 Prototyyppilaitteisto

7.2 Testimittaukset

Tutkimukseen liittyvä ensitestaus oli yksinkertainen ja nopea suorittaa, mutta se vaati useita toistokertoja elektroniikkaan tehtävien muutosten johdosta. Testauksen tarkemmat tiedot ja kuvat löytyvät luvusta 6.1. Kuviosta 20 voidaan nähdä, kuinka tässä vaiheessa mittaustulokset vaikuttavat varsin lupaavilta jatkon suhteen. Vaikka testausmenetelmät olivat signaalin tuottamisen kanssa varsin yksinkertaisia, eivät ne tee tuloksista yhtään sen epäluotettavampia. Tarkkuuden pitäisi mittauksissa olla riittävä, sillä tämä korreloituu lähinnä mittaustaajuuden suuruuteen. Tämä mittaus oli kuitenkin varsin helppoa toteuttaa häiriöttömästi, sillä oikeassa testitilanteessa huomioon tulee ottaa muun muassa tuulen ja muiden häiriötekijöiden kohinat signaalissa. Tulokset vaativat jatkossa kuitenkin vaativampaa ja tarkempaa tarkastelua. Tämän työn testilaskut ovat tehty yksinkertaisesti ja vain suuntaa-antavasti.



Kuvio 20 Testitulosten pohjalta lasketut taajuudet arvohuipuista

Kuvion 20 tuloksista voidaan erotella minuutin ajanjaksolta 6000 mittauksen huippuarvot ajan ja jännitesignaaleiden funktioina. Kuviossa on laskettu ainoastaan sinisen käyrän (laatikko jossa kolme anturia rinnan kytkettynä) arvoista saadut taajuudet, jotka vaihtelevat 0.2 ja 0.3 hertsin välillä. Punaisen ja sinisen käyrän taajuusarvot ovatkin siis identtisiä kuten pitääkin, kun anturilaatikat ovat päällekkäin. Signaalien voimakkuus johtuu anturiyksiköiden anturien lukumäärän vaihtelusta (ks. kappale 4.2).

7.3 Saksassa tehtyjen mittausten tulokset

Tämä mittaus suoritettiin Saksan Frankfurtin lentoaseman läheisyydessä. Mittaus kesti yhden vuorokauden verran, tarkemmat tiedot testitilanteesta löytyy kappaleesta 6.2. Mittauksesta laadittu spektrogrammi löytyy liitteestä 1. Spektrogrammissa tarkastellaan taajuutta ajan funktiona, jossa aika on esitetty sekunteina potenssiin 10^4 . Toisin sanoen, yhden sekunnin 10^4 väli vastaa noin 2 tunnin ja 47 minuutin ajanjaksoa. Taajuusalue kuvaajassa on <12 hertsiä.

Spektrogrammikuvaajaa tarkastellessa huomataan, että n. 8.2 hertsin kohdalla on ollut koko vuorokauden ajan voimakasta signaalia. Tämä voi olla laitteistosta itsestään johtuvaa häiriötä tai tuulilasin resonointia. Totuus tästä saattaisi kuitenkin selvitä vasta uusimalla mittaukset toisella laitteistolla.

Hiljaisempi aika $5 \cdot 10^4$ sekunnin ja $5,7 \cdot 10^4$ sekunnin välillä sijoittuu Frankfurtin lentokentän lentokieltoajaksi kello 23.00 - 05.00 väliselle ajalle. Tällä aikavälillä on lentoasemalla koneiden laskut ja nousut kielletty. Ensimmäinen päätelmä olikin, että kentältä tulisi täten ainakin jonkin verran infraääntä anturiyksikölle asti.

Toinen päätelmä oli, että kyseiset matalat äänet tulisivat läheisiltä raitiovaunukoilta, joilla kulkee raitiovaunuja puolen tunnin vuorovälein, eli 5,6 kertaa per 10 000 sekuntia ($1 \cdot 10^4$). Tämä sopisi paremmin yhteen näkyvien säännöllisesti toistuvien laajakaistaisempien, mutta mataliin taajuuksiin painottuvien signaalien kanssa. Tämä puoltaisi myös hiljaista hetkeä, jolloin raitiovaunukaan ei liikennöi. Kyseinen anturiyksikkö on myös melko lähellä (1 kilometrin päässä) raitiovaunujen päätepysäkistä, joten kuvioon tulee selkeä jaksollisuus. Koska hiljainen hetki sijoittuu lauantain ja sunnun-

tain vastaiseen yöhön, voidaan päätellä että spektrogrammikuvaajan alkupuolen tiheämpi kuvio johtuisi raitiovaunun tiheämmästä liikennöintivälistä. Tällöin liikennöintiväli on noin 10-20 minuuttia riippuen kellonajasta, ja raitiovaunujen kulkiessa molempiin suuntiin useammin ei spektrogrammiin tule niin selkeää kuviota näkyviin. Kyseinen hiljainen alue kuvaajassa saattaa myös toisaalta johtua sääolosuhteiden muutoksesta yötä vasten.

Tuloksia tarkastellessa tulee huomata, että spektrogrammi on ainoastaan tapa visualisoida äänen taajuusrakennetta ajan funktiona. Spektrogrammi ei ole varsinainen tulos tai tilastollista aineistoa, sen ollen vain yleiskuva tietyistä äänisignaaleista. Tilastolliseen tutkimukseen tarvittaisiinkin muita numeerisia mittauksia. Spektrogrammi onkin paras väline lähinnä tutkijalle itselleen, sillä sen avulla voidaan kahlata aineistoa läpi josta voidaan päättelämällä etsiä varsinaisia tutkimuskohteita.

8 POHDINTA

8.1 Yhteenveto

Opinnäytetyön tavoitteena oli rakentaa infraääniä havainnoiva ja tallentava prototyyppilaitteisto EMFI-anturin ympärille, rakentaa siihen sopiva vahvistinelektroniikka, sekä rakentaa anturille häiriötekijöitä minimoiva kotelointi. Lähes kaikki tarvittava materiaali tuli työn tilanneelta yritykseltä, joka myös kustansi aiheutuneet kulut muun muassa materiaalien osalta joita ei yrityksellä varastossa ollut. Opinnäytetyön aikana tehtiin myös alustavia markkinatutkimuksia liittyen infraäänten havainnointiin, mutta niiden esittely tässä ei ole olennaista.

Opinnäytetyö oli puhtaasti tutkimus- ja tuotekehitystyötä. Työ tehtiin pääasiassa jo tehtyjen tutkimusten pohjalta, joita on kirjoitettu harvakseltaan 1800-luvulta nykypäivään asti. Tutkimukset ovat peräisin sekä tunnetuilta professoreilta, että myös sotilas- ja siviilikäyttöön suunnitelluista tuotekehitysjulkaisuista. Opinnäytetyön tuotekehitystä tehtiin muun työn ohessa viikoittain, kuten rakennettiin prototyyppilaitteistoa ja

sen elektroniikkaa sekä sen koteloointia. Projekti oli niin virtaviivainen sen etenemisen ja lopputuloksen suhteen, ettei sen tarkempaa projektisuunnitelmaa missään vaiheessa tarvinnut tehdä.

Projektin edetessä huomattiin, että onnistuneella tuotteella olisi monta eri käyttökohdetta. Tämä toi epävarmuustekijöitä siihen, kuinka suuresti ja mihin infraäänilähteeseen resurssit tulisi kohdentaa. Suurimpana ongelmana olikin ajankäytölliset ongelmat, sillä varsinaisia suorittajia oli vain yksi. Tämän vuoksi yhden miehen kontolle jäi monta eri projektin tehtävää, kuten projektipäällikön, valmistajan, suunnittelijan ja organisoijan tehtävät. Tässä tilanteessa käsiteltäviä aihealueita tulee monia, jotka vaativat paljon organisointitaitoa sekä ajan että suunnitelmien suhteen. Yhden miehen kehitystiimi saattaa siksi tappaa luovuuden projektia kohtaan. Tällöin on tärkeää projektista löytää ne tärkeimmät aihealueet, joihin voi panostaa yksi kerrallaan ja järjestelmällisesti. Näissä tilanteissa huomaa kuitenkin hyvin vahvasti sen, kuinka tärkeää on luoda ryhmä, jossa pystytään vaihtamaan ajatuksia ja työtehtäviä, tällaisille projekteille.

Infraäänten mittaaminen ei ole helpoin kohde mittausteknologian alalla. Lähteitä on loppujen lopuksi hyvin harvakseltaan varsinkin Suomessa, jossa ei ole juuri minkäänlaista seismistä toimintaa. Tunnetuimpia lähteitä olisivat kuitenkin lentokoneiden jättopyörteet, sekä lähiaikoina paljon puheenaiheina olleet tuulivoimalat, joiden on raportoitu häiritsevän lähialueiden asukkaita ja muuta eliöstöä kuten lintuja ja lepakoita. Matalataajuuksinen ääni on vaikea tutkimuskohde myös siinä mielessä, että se vaatii erittäin herkän anturin ja pitkällä aikavakkiolla varustetun elektroniikan. Tämä onnistuu vielä nykypäivänäkkin lähinnä vain pitkälle kehitettyjen mikrofoni-sovellusten avulla.

Opinnäytetyölle oli haasteellista löytää riittävästi aikaa ja siitä syntyi suurin ongelma teknisten ongelmien lisäksi. Projektin aikana olisi saatu enemmän tuloksia eri lähteistä, jos sille olisi voitu pyhittää enemmän aikaa. Aikataulua kuitenkin helpotti työn tilaavan yrityksen hyvä sisäinen tekninen tietotaito, josta sai riittävästi tietoa ja materiaalia projektia varten. Opinnäytetyötä varten sai aina lisää tietoa yrityksen sisältä kun sitä vain tarvitsi, ja allekirjoittaneenkin tietotaito karttui runsain mitoin usean eri aihealueen tiimoilta projektin edetessä.

Opinnäytetyö saavutti kaiken kaikkiaan tavoitteensa varsin loistavasti, koska toimiva prototyyppi rakennettiin ja tuloksia saatiin. Valittu anturitekнологia toimi kuten toivottiin ja sitä tullaan jatkossa kehittämään vielä eteenpäin. Prototyyppi oli kuitenkin vielä vain suuntaa-antava jatkokehitystä varten, mutta takasi sille hyvän pohjan.

8.2 Hyöty ja jatkotoimenpiteet

Opinnäytetyö pohjustaa toimeksiantajalle tulevia projekteja, jotka liittyvät tämän tuotteen ja mahdollisten palveluiden kehitystyöhön. Tämä opinnäytetyö oli ensimmäinen tutkimus ja projekti tuotteen ympärille, ja siinä edettiin tasaisen varmasti suhteellisen lyhyessä ajassa. Toimeksiantaja saa työn kautta tietoa teknologian soveltuvuudesta ja mahdollisuuksista vastaaventyypisissä mittauksissa. Projektin avulla voidaan tehdä päätöksiä aihealueen jatkokehityksen suhteen ja alustavat suunnitelmat onkin jo tehty tulevaisuuden suhteen. Työ on vahvistanut työn tilaavan yrityksen ja allekirjoittaneen uskoa tuotteeseen, ja tarkoituksena onkin jatkaa yhdessä jatkokehitystä muun muassa maanjäristysten ennakkoinnin parissa, maailmanlaajuisten tiedonkeräys- ja varoitusjärjestelmien kehityksessä.

Seuraavat jatkotoimenpiteet joihin tullaan panostamaan, ovat kilpailevien tuotteiden jatkotutkimukset, markkinatutkimus ja tuotekehityksen jatkaminen. Tuotekehityksessä suurennuslasin alla olisivat suurimpina kohteina järjestelmän rakentaminen langattomaksi sekä tiedonsiirron osalta että myös maailmanlaajuisista näkökulmaa tarkastellessa tietojen kerääminen yhteiseen tietopankkiin. Tietojen keräys tapahtuisi aiheesta kiinnostuneiden asiakkaiden toimesta joille järjestelmä toimitettaisiin. Ympäri maailmaa saatavalla datalla pystyttäisiin laskemaan kolmiolaskennalla reaaliajassa maanjäristysten esiäänien infrataajuudet ja niiden lähteet. Dataa voitaisiin jakaa muille järjestelmille, sekä sen pohjalta rakentamaan ennakkovaroitusjärjestelmä maanjäristysten varalle. Tällainen maailmanlaajuinen tutkimus toisi myös yritykselle suunnattoman tärkeää tunnettavuutta tekniikan alalla.

Tuotekehitys tulee kohtaamaan suurimmat haasteensa sekä mittadatan luotettavuudessa, että globaalien tiedonkeräysjärjestelmien kehityksessä. Tiedon luotettavuus on erittäin tärkeässä asemassa tämän kaltaisessa tuotteessa. Tuotekehityksen myötä haasteita tulee varmasti ilmi lisää useita muitakin, mutta ongelmista ylitsepääseminen tuo tuotteelle vain lisäarvoa jatkoa ja etenkin markkinoita ajatellen.

LÄHTEET

AFSOC Crash Report Faults Understanding Of Osprey Rotor Wake, 2014:
<http://breakingdefense.com/documents/afsoc-crash-report-faults-understanding-of-osprey-wake-effects/>

Aircraft Wake Turbulence An Interesting Phenomenon Turned Killer, 1971:
<http://www.airpower.maxwell.af.mil/airchronicles/aureview/1971/jul-aug/carten.html>

Bowman, H. S., and A. J. Bedard (1971), Observations of infrasound and subsonic disturbances related to severe weather, Geoph. J. R. Astr. Soc., 26, 215–242.

Emfit Oy (2014). EMFi sensors, L-type sensor specifications.

Evers, L.G. (2008), The inaudible symphony: on the detection and source identification of atmospheric infrasound

Gossard, E. E., and W. H. Hooke (1975), Waves in the atmosphere, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.

Gutenberg, B. (1939), The velocity of sound waves and the temperature in the stratosphere in southern California, Bull. Am. Meteo. Soc., 20, 192–201.

Hillenbrand, J., Sessler, G. (1999). Mechanical and electrical response of charged polymers with cellular structure, IEEE CEIDP, 43-46

How stuff works article, 2010: <http://science.howstuffworks.com/environmental/green-science/wind-turbines-health1.htm>

Huttunen, Heikki, 2003: Johdatus signaalinkäsittelyyn <http://www.tekniikka.oamk.fi/~jyrkila/Moniste1.pdf>

Liszka, L. (1974), Long-distance propagation of infrasound from artificial sources, J. Acoust. Soc. Am., 56, 1383–1388.

Láslo G. Evers (2008) ,The inaudible symphony: on the detection and source identification of atmospheric infrasound

LÜ Jun, YANG Yi-Chun, GUO Quan, FENG Hao-Nan, TENG Peng-Xiao (2012), Anomalous infrasonic waves before a small earthquake in Beijing
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cjg2.1751/abstract>

Michel, U., and P. Böhning, 2002: Investigation of aircraft wake vortices with phased microphone arrays

Mutschlecner, J. P., and R. W. Whitaker (2005), Infrasound from earthquakes, J. Geophys. Res., 110, D01108

National Instruments data acquisition brochure, 2014: <https://decibel.ni.com/content/servlet/JiveServlet/previewBody/18476-102-1-34455/Data%20Acquisition%20Brochure.pdf>

NBC uutisartikkeli, 2003: Infrasound linked to spooky effects:
http://www.nbcnews.com/id/3077192/ns/technology_and_science-science/t/infrasound-linked-spooky-effects/#.VHnjKzGsWRQ

Nilsson, J., Riedel, S. (2000). Electric Circuits, 6th ed., Prentise-Hall, Upper Saddle River (NJ).

Pain, H. J. (1983), The physics of vibrations and waves, John Wiley & Sons Limited, Great Britain.

Pilot and air traffic controller guide to wake turbulence, 2014:
http://www.faa.gov/training_testing/training/media/wake/04SEC2.PDF

Preamplifier.org preamp definition, 2014: <http://www.preamplifier.org/#preamp-definition>

Rubin, William L., (2005), The Generation and Detection of Sound Emitted by Aircraft Wake Vortices in Ground Effect

Shams, Qamar A. and Burkett, Cecil G., August 2008: A Portable Infrasonic Detection System, NASA Langley Research Center Hampton, Virginia
<http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20080034649.pdf>

Smirnov, A. A. (2006), Identification of the oil-well gas flare group as a unique infrasound source using I31KZ data, in Infrasound Technology Workshop 2006, Wilson Infrasound Observatories, Geophysical Institute, University of Alaska Fairbanks, Fairbanks, USA.

SPU-eristeet verkkosivut, 2014: <http://www.spu.fi/tuotteet/tuote/spu-p/>

Symons, G. J. (Ed.) (1888), The eruption of Krakatoa and subsequent phenomena, Trübner & Co., London.

Tandy, Vic and Lawrence, Tony R., 1998: The Ghost in the Machine
<http://www.richardwiseman.com/resources/ghost-in-machine.pdf>

Wilson, C. R. (1981), Atmospheric infrasound, Antarctic J. of the U.S., 16, 198–199.

LIITTEET

Liite 1. Yhden vuorokauden spektrogrammi, mitattu lähellä Frankfurtin lentoasemaa

