

JÄRJESTELMÄ ÄÄNEN ETENEMISEN MITTAAMISEEN

Panu Maijala

VTT Tuotteet ja tuotanto
PL 1307, 33101 Tampere
Panu.Maijala@vtt.fi

1 JOHDANTO

Äänen leviämiseen ilmakehässä on kehitetty monia malleja. Tarkimpien mallien tuottamat tulokset eroavat toisistaan vain desibelin murto-osia. Kirjallisuudesta kuitenkin löytyy hyvin niukasti vertailuja todellisiin mittauksiin. Olemme VTT:llä tehneet jo useiden vuosien ajan evaluointeja ja huomanneet mallien toimivan huonosti [1]. Suurimmat virheet syntyvät, kun ilmakehän vaihtelevia ominaisuuksia ei huomioida riittävän tarkasti — sekä mallissa, että mallia verifioivissa mittaustilanteissa.

Ilmakehän akustiikan ilmiöiden tutkimus on tuottanut paljon kokeellista aineistoa eri puolilta maailmaa. Julkaistuista tutkimustuloksista laajimpia ovat olleet norjalaisten vuosien 1994–1996 aikana tekemät ”Norwegian Trials” [2]. Norjalaiset tekivät mittaukset kampanjatyylisiin: paljon miehiä ja kalustoa kentällä laajalle alueelle levittäytyneenä, tuloksena valtava määrä dataa lyhyeltä ajanjaksolta. Tilastollisesti edustavampi aineisto saadaan mittaamalla jatkuvasti (kerran tunnissa) yli vuoden ajan, kuten japanilaiset [3].

Päätimme kehittää oman etenemismallin, jonka luotettavuuden lisäämiseksi fysikaalisen mallin tulokset käsitellään erityisellä tilastollisella mallilla. Tässä paperissa esitetään pitkälle automatisoitu mittausjärjestelmä, jonka tehtävänä on tuottaa kokeellista dataa tilastolliseen mallin tarpeisiin. Järjestelmällä on kerätty dataa vuodesta 2001 lähtien, mutta tässä paperissa esitetty koejärjestely on ollut yhtäjaksoisesti käynnissä maaliskuusta 2004 lähtien. Mittaukset on tarkoitus ajaa alas marraskuussa 2005.

Tutkimus on osa Puolustusvoimien (Ilmavoimat) laajaa Akusti-tutkimushanketta, jossa tutkitaan ilmatilan akustisen valvontajärjestelmän toteutusta ja toimivuutta Suomen olosuhteissa. VTT on koordinoanut työtä VTT:n lisäksi kolmen muun tutkimuslaitoksen välillä. Näistä Teknillisen Korkeakoulun Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio on osallistunut mittausjärjestelmän kehittämiseen, Oulun yliopiston Sodankylän geofysiikan observatorio on tutkinut kehittyneempiä mittausalgoritmeja, yhtenä tavoitteena vähemmän häiritsevät mittausäänet ja Ilmatieteen laitos on evaluoinut tutkimuksen meteorologisen aineiston edustavuutta. Tutkimuksella on julkiset www-sivut osoitteessa <http://akusti.vtt.fi>.

2 MITTAUSJÄRJESTELYT

2.1 Mittausjärjestelyjen yleiskuvaus

Äänenetenemismittausten ongelmana on aina ollut ilmakehän ominaisuuksien kuvaaminen riittävän tarkasti samanaikaisten äänimittausten kanssa. Tässä tutkimuksessa päätettiin keskittyä yhden, akustisesti homogeenisen, paikan kuvaamiseen mahdollisimman tarkasti. Mittauspaikan valinta oli monien kompromissien summa ja Sodankylästä löytyi topografialtaan riittävän tasainen ja matalakasvustoinen alue läheltä erinomaisia tutkimusfaciliteetteja: mittausalueella toimii Ilmatieteen laitoksen Arktinen tutkimusasema <http://fmiarc.fmi.fi> ja Geofysiikan observatorio <http://www.sgo.fi>.

Äänilähteen ja vastaanottopisteen välillä on etäisyyttä yli kolme kilometriä. Pisteiden korkeusero on alle 5 metriä, eikä välissä ole mäkiä.

2.2 Äänenetenemismittaukset

Äänilähde (kuva 1) on sijoitettu Sodankylän lentokentälle ja kahdeksasta mikrofoniasta koostuva antenni (kuva 2) noin kolmen kilometrin päähän Halssiaapa-nimiselle suolle. Kerran tunnissa, ympäri vuorokauden, suolla käynnistetään äänitys samanaikaisesti lentokentän äänilähteen kanssa ja saaduista vasteista lasketaan mm. äänenetenemisvaimennus ja kulkuaikeviive. Äänityksen ja toiston samanaikaisuus¹ on varmistettu synkronoimalla Linux-palvelinten kellot NTP-protokollalla² Mittatekniikan keskuksen (MIKES) stratum 1-aikapalvelimiin ja Funetin stratum 2- ja 3-aikapalvelimiin. Lisäksi kaikki palvelimet voivat hyödyntää GPS-atomikelloja pitkien verkkokatkosten aikana.

Heräte sisältää taajuuksia välillä 40...1600 Hz ja akustinen signaali saadaan talteen hieman yli 100 dB:n dynamiikalla kahdeksalla kanavalla. Pitkät analogisen signaalin siirtomatkat suolla rajoittavat kaistaa. AD-muunnos tapahtuu 24-bitin resoluutiolla ja 48 kHz:n näytteenottotaajuudella, mutta arkistoitava kaista on 3 kHz.

2.3 Taustakohinamittaukset

Taustakohinan vaihtelu sääolosuhteiden mukana on yksi mielenkiinnon kohteista tutkimuksessa. Mittaus toistetaan 15 minuutin välein vastaavasti kuten äänenetenemismittauksessa, mutta kanavia on vain kaksi ja arkistoitava kaista on 6 kilohertsiä.

¹Aikavirhe on monen tekijän summa: äänityspalvelimen ja äänentoistopalvelimen kellojen eroa eikä palvelimien ohjelmien suorituslatensseja voi ennakoita. Järjestelyillä aikavirheen keskiarvoksi on saatu 0.69 ms (keskihajonta 0.70 ms).

²<http://www.ntp.org>.



Kuva 1: Äänilähde Sodankylän lentokentällä. Etualalla bassokaiutinta varten rakennettu sääsuoja telineen päällä ja takana 4 metriä korkea torviasetelma. Päällystetty kiitotie on kaiuttimien takana. Kaiutinten edessä mikrofoni automaattikalibrointia varten.

2.4 Säähavainnot

Koskaan aiemmin kirjallisuudessa ei ole raportoitu yhtä kattavia säähavaintoja äänene-
tenemismittauksissa. Ilmatieteen laitoksen paikallinen havainnointiasema sijaitsee muu-
taman sadan metrin etäisyydellä vastaanottopisteestä.

Automaattisten järjestelmien keräämän sääinformaation lisäksi henkilökunta tekee kol-
men tunnin välein havainnot mm. maanpinnan laadusta, lumen syvyydestä, näkyvyy-
destä ja kokonaispilvisyydestä. Asemalta lähetetään kaksi kertaa vuorokaudessa radio-
sondi vety- tai heliumpalloilla, joka antaa luotauksen ilmakehän ominaisuuksista jopa
30 km:n korkeuteen saakka. Asemalla on myös 48 metriä korkea masto, josta saadaan
monipuolista dataa.

Äänilähteen luona on SODAR (kuva 3), jolla saadaan hetkellinen³ lämpötilaprofiili ja
tuulen eri komponentit 25 metrin välein 750 metrin korkeuteen saakka. Lisäksi vastaan-
ottopaikalla on ultraääni-anemometri, jolta luetaan 10 kertaa sekunnissa mikrofoni-
luona vallitseva tuulennopeus, -suunta ja ilman lämpötila.

Lisäksi suorista havainnoista lasketaan useita erilaisia meteorologisia tunnuslukuja, ku-

³SODAR integroi tuuli- ja lämpötilaprofiilit halutun ajanjakson yli, tutkimuksessa on käytetty
10...30 minuutin integrointiaikaa.



Kuva 2: Akustinen antenni maaliskuussa 2004. Taustalla näkyy juuri asennettu akustinen anemometri.

ten Pasquil-stabiilisuusindeksit ja Bulk Richardson-luku. Lisäksi dataa saadaan HIRLAM-säämallista. Kaiken kaikkiaan riippuvia ja riippumattomia muuttujia tilastollisen mallin muodostamisessa on käytettävissä toista sataa.

2.5 Järjestelmän automatiikkaa

Äänimittauksen heräte on kuuloalueella ja voi häiritä kuuluvuusalueella ihmisiä. Tämän ongelman hoitaminen on aiheuttanut eniten työtä järjestelmää kehitettäessä, sillä kuuluvuusalueen koko vaihtelee useita kertaluokkia sääolosuhteiden mukaan — joissakin olosuhteissa, suuresta lähetystehosta huolimatta, signaalia on mahdotonta saada perille kolmen kilometrin päähän ja joissakin olosuhteissa signaali on havaittu kymmenien kilometrien päässä pienelläkin lähetysteholla. Tämä ongelma saatiin tyydyttävästi ratkaistua laskemalla vastaanotopisteessä vallitsevalle tuulennopeudelle 10 minuutin keskiarvo aina ennen mittausta ja päättelemällä siitä, sekä viikonpäivästä, että vuorokauden ajasta sopiva lähetysteho kullekin mittaussignaalille.

Järjestelmä tarkastaa aina ennen mittaussekvenssiä sekä äänilähteiden että mikrofonien toimintakunnon mittaamalla testisignaalin tason kaiutinten välittömään läheisyyteen sijoitetulla mikrofonilla ja vastaavasti vastaanottoantennin mikrofonit testataan Brüel & Kjær:n Charge Injection Calibration (CIC) –menetelmää. CIC-menetelmällä saadaan testattua mikrofonin, esivahvistimen, kaapelin ja mittausvahvistimen yhteistoiminta. Poikkeama tasoissa aiheuttaa välittömän virheilmoituksen sekä sähköpostitse, että SMS-



Kuva 3: *Doppler-SODAR mittaa ilmakehän ominaisuuksia äänilähteen lähellä lentokentällä.*

viestinä matkapuhelimeen. Hankkeen aikana on kirjoitettu näihin kaikkiin tarkoituksiin omat ohjelmansa. Automaattisten kalibrointien lisäksi järjestelmä on säännöllisesti kalibroitu manuaalisesti akustisin ja sähköisin menetelmin.

Mittaustiedot siirretään automaattisesti Sodankylästä Tampereelle arkistointipalvelimiin. Myös arkistointiprosessiin on ohjelmoitu älykkyyttä: esimerkiksi kaikelle tiedolle lasketaan ennen ja jälkeen siirtoa tarkistussummat, ja niiden pitää täsmätä ennen tiedon arkistoitavaksi hyväksymistä. Virhe johtaa aina uudelleenyritykseen. Kaikki tieto loki-tietoineen arkistoituu vähintään kahteen fyysisesti eri paikkaan.

Lisäksi järjestelmään on ohjelmoitu itsediagnostiikkaa. Esimerkkinä yksi ohjelma tarkkaile SODAR:n toimintaa ja ongelmatapauksissa järjestelmä ajaa itsensä alas ja käynnistyy uudelleen. Tästäkin tapahtumasta lähtee viesti ylläpidon matkapuhelimiin.

Kaikkiin ongelmiin on mahdotonta etukäteen valmistautua: kerran alkoi tulla virheilmoituksia äänitysongelmista. Syyksi paljastui, että eräs henkilö oli vahingossa irroittanut AD-muuntimen virtajohdon. Toisella kerralla kaivinkone oli kaivanut kaapelit poikki. Kun järjestelmän toimintaa valvotaan yli 800 kilometrin päässä, on mahdollisimman kattavasta automatisoinnista kuitenkin paljon hyötyä.

2.6 Tulosten edustavuus, luotettavuus ja toistettavuus

Ilmatieteen laitos on arvioinut säähavaintojen edustavan hyvin tutkimusalueella vallitsevia olosuhteita muutamaa poikkeusta lukuunottamatta ja tulosten olevan siirrettävissä vastaaviin ympäristöihin [4]. Mittausjärjestelyistä on tehty hyvin yksityiskohtainen 339-sivuinen dokumentaatio [5].

3 YHTEENVETO

Äänenetenemismallien suurimmat puutteet ovat ilmakehän jatkuvasti muuttuvien ominaisuuksien huomioimisessa. Mallien täytyy huomioida ilmakehä osittain tilastollisena muuttujajoukkona. Tässä on esitetty mittausjärjestelmä, jonka tuottamalla tuloksilla voidaan selittää eri meteorologisten ilmiöiden vaikutusta äänen etenemiseen ja muodostaa vastaava tilastollinen malli.

KIITOKSET

Puolustusvoimat on rahoittanut koko tutkimuksen. Suuri osa tutkimuksen mittalaitteista on Ilmavoimien sekä Puolustusvoimien Teknillisen Tutkimuslaitoksen omaisuutta.

VIITTEET

- [1] MAIJALA P, SAARINEN K, & MELLIN V, Äänen leviämistä mallintavan ohjelmiston käyttöönotto ja evaluointi, Luottamuksellinen asiakasraportti TUR C064, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 2001.
- [2] HOLE L R, Sound propagation in the atmospheric boundary layer. an experimental and theoretical study. ph.d. thesis., 1998.
- [3] KONISHI K, TANIOKU Y, & MAEKAWA Z, Long time measurement of long range sound propagation over an ocean surface, *Applied Acoustics*, **61**(2000), 149–172.
- [4] MAMMARELLA I & HYVÖNEN R, The structure of the abl at sodankylä, Report by fmi-asi group, Finnish Meteorological Institute, Energy and Environment, 2004.
- [5] KARRU M & MAIJALA P, Automaattinen ilmakehän akustiikan mittausjärjestelmä, Julkinen tutkimusraportti TUO56-041263, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 2004.