

TUULEN VAIKUTUS HUUTAJAN SUUNTAKUVIOON

Ville Pulkki¹, Ilkka Huhtakallio¹ ja Timo Lähivaara²

¹ Aalto-yliopiston elektroniikan ja sähkötekniikan korkeakoulu
Akustiikan laboratorio
Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos, Espoo
Ville.Pulkki@aalto.fi, Ilkka.Huhtakallio@aalto.fi

² Itä-Suomen yliopisto
Sovelletun fysiikan laitos, Kuopio
Timo.Lahivaara@uef.fi

Tiivistelmä

Jos pistemäinen äänilähde liikkuu väliaineen suhteen, vastatuulen puolelle aiheutuu suurempi äänenpaine kuin myötätuulen puolelle. Tämä on ristiriidassa yleisen tietämyksen kanssa, jossa vastatuuleen huuto ei "kanna", ja myötätuuleen taas äänen oletetaan "kantavan". Tässä työssä tutkittiin tuulen vaikutusta säteilyyn ihmisen pään kokoisesta lähteestä elektroakustisin mittauksin kaiuttomassa huoneessa sekä tietokonesimulaatioiden avulla. Tuloksissa näkyy, että vastatuuleen ääni heikkenee hiukan, ja myötätuuleen vahvistuu hieman, riippuen taajuudesta sekä äänilähteen tyypistä. Simulaatioiden perusteella voidaan olettaa, että virtausgradientit huutajan ympäristössä sirottavat lievästi ääntä pois päin vastatuulesta, ja kohdistavat jonkin verran ääntä myötätuulen suuntaan, mikä ainakin osin selittää jokamiehen kokemuksen äänen "kantamisesta" myös lähteen välittömässä läheisyydessä.

1 JOHDANTO

Ihmisen huuto kuuluu huonommin vastatuuleen kuin myötätuuleen yleisen uskomuksen mukaan. Jokamies selittää tämän intuitiivisesti ajattelemalla, että tuulen nopeus muuttaa äänen nopeutta. Tämä ei ole selvästi relevantti selitys, jo sen takia, että tyypilliset tuulen nopeudet ovat paljon alhaisempia kuin äänen nopeus. Akustinen kirjallisuus selittää ilmiön tuulen nopeusgradienttien avulla. Maanpinta aiheuttaa kitkaa, ja tuulen nopeus kasvaa noustaessa ylöspäin. Tuulennopeusgradientti vastaavasti taivuttaa ääntä ylöspäin vastatuulen puolella, sekä alemmas myötätuulen puolella [1]. Tämä ilmiö vaatii kuitenkin kymmeniä tai satoja metrejä lähteen ja vastaanottajan väliin ollakseen huomattava, eikä siis selitä miksi ihmisestä tuntuu jo lyhyellä etäisyydellä, että ääni ei "kanna".

Ristiriitaisesti jokamiehen oletuksen kanssa akustinen teoria ennustaa, että pistemäinen lähde säteilee suuremmalla amplitudilla vastavirtaan kuin myötävirtaan [2, 3]. Vastavirran puolella äänipaine voimistuu kertoimella $(1 + v/c)^2 / (1 - v/c)^2$ verrattaessa myötätuulen puolella mitattuun arvoon, missä v on tuulen nopeus, ja c on äänen nopeus. Tämä ilmiö on nimetty termillä "convective amplification" [4], ja se on verifioitu mittauksin putkissa [5] sekä tuuliturbiinin lavoissa [6].

Ihmisen puheentuottomekanismia [7] ei voida olettaa pistemäiseksi lähteeksi, vaan se muistuttaa enemmän mäntää tai putkea kiinteän pallon pinnalla. Kun väliaine liikkuu, aiheuttaa ihminen monimutkaisia turbulensseja sekä virtausgradientteja ympärilleen [8], eikä analyttistä teoriaa voida käyttää ratkaisemaan äänen säteilyä tilanteen monimutkaisuuden takia. Äänen säteilyä ihmisestä tuulessa ei ole tutkittu aiemmin, luultavasti johtuen sen mittaamisen vaikeudesta.

2 METODIT

2.1 Mittaukset

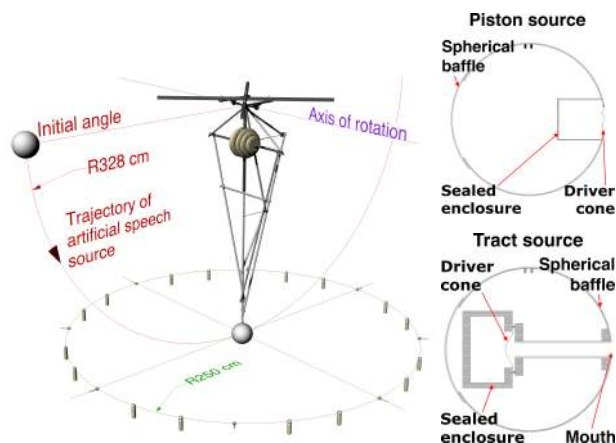
Kuvassa 1 on esitetty mittauksessa käytetty järjestelmä. Äänilähteenä toimi pyöreä kaiutin (halkaisija 30 cm), jonka koko on samaa luokkaa kuin ihmisen pään koko. Mittaukset suoritettiin kahdella erilaisella äänilähteellä. Kaiuttimen sisään asennettu putki mallintaa yksinkertaistettua vokaaliväylää, ja samalla soinnillisten äänteiden tuottoa (tract source, väylälähde). Kaiutinkartio asennettuna pallon pinnalle mallintaa taas tilannetta, jossa äänilähde on lähellä suuta, kuten esim. konsonanteissa /s/ ja /f/ (piston source, mäntälähde).

Kun heiluri päästetään alas korkeimmasta kohdastaan, se kiihdyttää nopeasti kaiuttimen ympyränmuotoiselle radalle. Maksiminopeus saadaan alimman pisteen ympärillä noin 85 ms ajaksi, jolloin se on $13.2 \text{ m/s} \pm 0.13 \text{ m/s}$ väylälähteellä tai $12.7 \text{ m/s} \pm 0.08 \text{ m/s}$ mäntälähteellä. Kaiutin liikkuu 108 cm matkaa ja 19° ympyrärataa tuona aikana. Ympyräradan keskipisteen ympärille rakennettiin 24 mikrofonin hila tasaisesti eri suuntiin horisontaalitasossa.

Virtauskenttä tuotettiin äänilähteen ympärille heilurilla, joka tuottaa ideaalisen virtauskentän lähteen ympärille, koska mitään muita turbulensseja ei esiinny kuin lähteen itsensä tuottamat. Mittausmenetelmän heikko kohta on suhteellisen lyhyt mittausaika, sekä kaiuttimen liikkuminen mikrofonien suhteen. Toisaalta, mittausympäristö on myös hiljainen, ja lähdesignaali on deterministinen (multitone). Mikrofonit olivat myös liikkumattomia väliaineen suhteen, joten mikrofonien itsensä aiheuttama tuulimelu ei ole ongelma tässä mittauksessa. Mitatut signaalit esikäsiteltiin poistamalla liikkeen aiheuttama taajuussiirtymä, sekä kompensoimalla etäisyysvaimenema. Säteilyspektrin muutos estimoidaan mittaamalla äänenpainetaso kolmasosaoktaavisuodatuksella, ja vertaamalla mitattuja arvoja liikkumattomalla lähteellä mitattuun.

2.2 Laskennallinen mallinnus

Ilmavirtaus ääniväylässä ja sen ympäristössä mallinnettiin kaupallisella virtauslaskentaohjelmalla Ansys CFX. Laskenta toteutettiin ajasta riippumattomana käyttäen shear-stress-transport (SST) mallia turbulenssin mallinnukseen. SST virtausmallia käytettiin, koska se yhdistää k-omega ja k-epsilon turbulenssimallien hyvät puolet. Virtauskenttä simuloitiin suorakulmaisessa särmiössä $[0, 1.5] \times [-1.5, 1.5] \times [0, 1.5] \text{ m}^3$, joka sisältää sirottavan pallonmuotoisen kappaleen. Sirottajan keskipiste asetettiin origoon, joten sirottajan geometriasta sisältyi malliin yksi neljännes. Lisäksi oletettiin, että ääniväylä



Kuva 1: Vasen: Heiluri, jolla liikutettiin äänilähdettä kaiuttomassa huoneessa. Heilurilla saatiin aikaan n. 12 m/s nopeus 100 ms ajaksi ensimmäisen heilahduksen alimmassa kohdassa. Oikea: Mittauksissa käytetyt äänilähteet.

osoittaa positiivisen y -akselin suuntaan. Ulkoreunoille ($y = \pm 1.5$ m) asetettiin joko inlet tai outlet reunaehto riippuen virtauksen tulosuunnasta. Tasot $x = 0$ m ja $z = 0$ m mallinnettiin symmetria reunaehdolla, tasot $x = z = 1.5$ m free-slip reunana ja kaikki muut pinnat no-slip reunana.

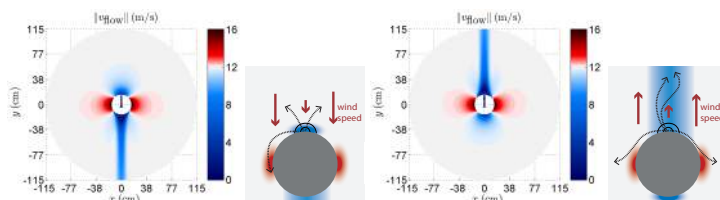
Tässä työssä linearisoidut Euler yhtälöt virtaavassa väliaineessa (akustinen kenttä) simuloitiin epäjatkovaa Galerkinin (DG) menetelmää käyttäen [9, 10]. Epäjatkuva Galerkinin menetelmä valittiin, koska se soveltuu erittäin hyvin aaltoilmiöiden mallinnukseen. Käytetyn menetelmän etuihin kuuluu muun muassa sen kyky ratkaista laskentaongelmia monimutkaisissa geometrioissa (hyödyntää samoja laskentaverkkoja, kun äärellisten elementtien menetelmä) ja toisaalta se soveltuu erittäin hyvin rinnakkaislaskentaan (mahdollistaa tietokonekapasiteetin täyden hyödyntämisen).

Akustinen kenttä ratkaistiin pallogeometriassa ajasta riippuvana ongelmana. Laskenta-geometrian ulkoreunalle asetettiin absorboiva reunaehto ja muille pinnoille Neumann reunaehto. Lähdefunktioksi Neumann-pinnalle (ääniväylän päätyyn) asetettiin Gaussin funktion ensimmäinen aikaderivaatta. Lisäksi edellä mainittua absorboivaa reunaehto parannettiin lisäämällä 10 cm paksuinen vaimennuskerros, jolla ehkäisti mahdolliset absorboivan reunaehdon tuottamat takaisinheijastukset.

3 TULOKSET

3.1 Simuloitu tuulikenttä

Kuvassa 2 on esitetty väliaineen virtausnopeus simuloituna mittauksissa käytetylle pallolle tuulenopeudella 12 m/s. Nähdään, että vastatuulella suuaukon eteen muodostuu



Kuva 2: Simuloitu väliaineen virtausnopeus a) vastatuuli b) oletettu äänisäteiden taipuminen vastatuulessa c) myötätuuli d) oletettu äänisäteiden kohdistuminen.

tyyni alue, joka saattaa taivuttaa ääntä sivuille päin syntyneiden nopeusgradienttien takia kuten esitetty kuvassa b). Vastaavasti, kuvassa c) näkyy että vastatuulen puolella säteilijä sijaitsee jättövirtauksessa, jonka ympärillä olevat nopeusgradientit saattavat taivuttaa ääntä kohti myötätuulta kuten esitetty kuvassa d).

3.2 Mittaustulokset

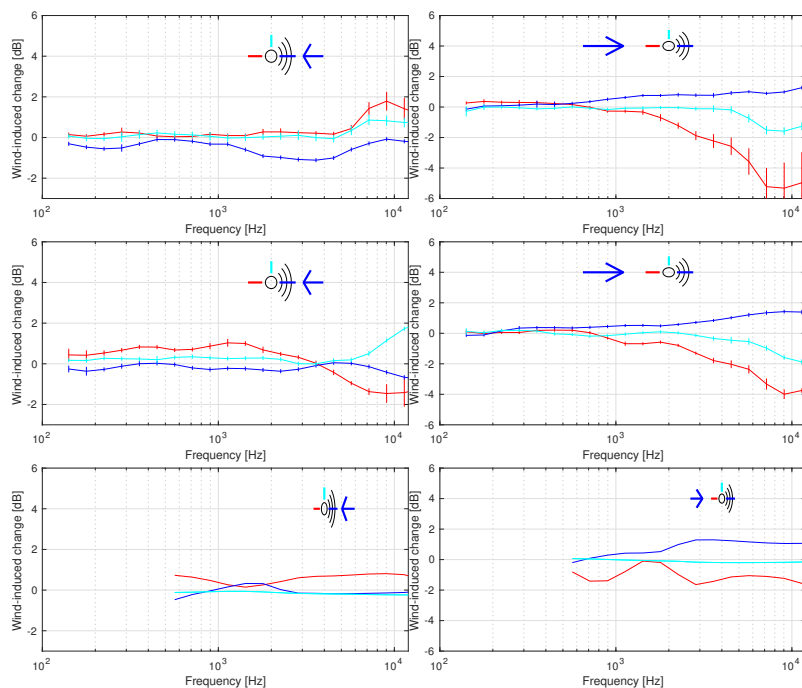
Kuvan 3 vasemman sarakkeen kahdessa ylimmässä kuvassa on esitetty mittaustulokset vastatuulessa, eli silloin kun äänilähteen säteilijä on vastatuulen puolella. Niistä nähdään, että virtauksella ei ole juurikaan vaikutusta äänen säteilyyn eri suuntiin, tosin hyvin pieni vaimenema voidaan nähdä eteenpäin, ja pieni voimistuma taaksepäin. Toisaalta, pistemäinen äänilähde säteilee teorian mukaan ääntä noin 1.2 dB voimakkaammin vastatuuleen kuin myötätuuleen tässä virtaustilanteessa, mikä ei selvästi pidä paikkaansa mittausten mukaan, vaan tilanne on lähinnä päinvastainen.

Mittaustulos väylä- ja mäntäsäteilijöiden kanssa on melko samanlainen taajuuksilla alle 4 kHz, mutta suuria eroavaisuuksia löytyy sen yläpuolella. Luultavasti väliaineen virtaus vaikuttaa säteilyyn eri tavalla paine- ja hiukkasnopeuskomponentteihin. Putken resonanssit aiheuttavat voimakkaita hiukkasnopeuskomponentteja, kun taas mäntälähteellä ei tällaisia nähdä.

Kuvan 3 oikeassa sarakkeessa on esitetty vastaavat tulokset myötätuulessa. Yhdenmukaisesti vastatuulimittausten kanssa voidaan nähdä, että ääni on voimistunut hieman myötätuulen puolella. Voidaankin olettaa, että myötätuuli aiheuttaa lievää äänen kohdistumista, jonka oletettu mekanismi on esitetty kuvassa 2 d). Suuri vaikutus nähdään myötätuulituloksissa säteilyssä vastatuuleen, missä suuria vaimenemia havaitaan. Voidaan olettaa, että tuuligradientit ja/tai turbulenssit lähteen sivuilla vähentävät äänen diffraktoitumista lähteen ympäri.

3.3 Simulaatiotulokset

Kuvan 3 alarivissä esitetään ääniväylälähdettä (ylin rivi) vastaavat simulaatiotulokset. Vaikka absoluuttiset tasonmuutokset ovat hieman erilaiset kuin mittauksissa, ovat tulokset kvalitatiivisesti samanlaiset. Simulaatio ennustaa oikein sen, että säteily vaimenee vastatuulen suuntaan, ja voimistuu hieman myötätuulen suuntaan. Mittauksissa efekti oli



Kuva 3: Äänilähteen säteilijä suunnattuna vastatuuleen (vasen) ja myötätuuleen (oikea), väliaineen liikkeen aiheuttama muutos magnitudispektrissä eri säteilysuuntiin. Yläkuvat: heilurimittaus väylälähteellä, keskikuvat: heilurimittaus mäntälähteellä, alakuvat simulointi väylälähteellä. Mittauksissa esitetään kolmen mittauksen keskiarvo ja keskihajonta.

suurempi, kun säteilijä oli myötätuulen puolella, minkä malli myös näyttää, tosin hieman miedompana efektinä.

Samalla mallilla simuloitiin myös pistelähteen säteily, jossa saatiin 12 m/s virtausnopeudessa 0.6 dB voimistuma vastatuulen puolella, ja vastaava vaimentuma myötätuulen puolella.

4 YHTEENVETO

Väliaineen virtaus normaaleilla tuulen nopeuksilla aiheuttaa monimutkaisen virtauskentän äänilähteiden ympärille, joiden dimensiot ovat samaa kokoluokkaa ihmisen kanssa. Virtauskenttä vaikuttaa säteilyyn monimutkaisesti, riippuen sekä säteilijän sijainnista että tyypistä. Yksinkertaistettuna voidaan kuitenkin todeta, että myötätuulen puolella ääni voimistuu hieman oletettavasti nopeuskentän aiheuttaman fokuusoitumisen johdosta. Vastatuulen suuntaan säteily taas vaimenee enemmän tai vähemmän riippuen lähteen

sijainnista. Jos lähde on vastatuulen puolella, ääni vaimenee hieman vastatuulella verrattuna pistemäisen lähteen säteilyyn, ja jos säteilijä on myötätuulen puolella, vaimenee säteily vastatuulen puolella huomattavasti.

VIITTEET

- [1] U. Ingård. A review of the influence of meteorological conditions on sound propagation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 25(3):405–411, 1953.
- [2] P.M. Morse and K.U. Ingard. *Theoretical Acoustics*. McGraw-Hill, 1968.
- [3] A. Dowling. Convective amplification of real simple sources. *Journal of Fluid Mechanics*, 74(03):529–546, 1976.
- [4] A.P. Dowling. Steady-state radiation from sources. *Handbook of Acoustics*, pages 99–117, 1998.
- [5] U. Ingard and V.K. Singhal. Upstream and downstream sound radiation into a moving fluid. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 54(5):1343–1346, 1973.
- [6] S. Oerlemans, P. Sijtsma, and B. Méndez López. Location and quantification of noise sources on a wind turbine. *Journal of sound and vibration*, 299(4):869–883, 2007.
- [7] J.L. Flanagan. *Speech Analysis, Synthesis and Perception*. Springer, 1972.
- [8] J.D. Anderson Jr. *Fundamentals of aerodynamics*. Tata McGraw-Hill Education, 1985.
- [9] J.S. Hesthaven and T. Warburton. *Nodal Discontinuous Galerkin Methods: Algorithms, Analysis, and Applications*. Springer, 2007.
- [10] T. Lähivaara and T. Huttunen. A non-uniform basis order for the discontinuous Galerkin method of the 3D dissipative wave equation with perfectly matched layer. *Journal of Computational Physics*, 229:5144–5160, 2010.