

AMPLITUDIMODULOIDUN ÄÄNEN HÄIRITSEVYYS JA SANKTIO

Valtteri Hongisto ja Petra Virjonen

Turun ammattikorkeakoulu Osakeyhtiö
Lemminkäisenkatu 14-18 B
20520 Turku
valtteri.hongisto@turkuamk.fi

Tiivistelmä

Amplitudimoduloitu (AM) ääni on voimakkuudeltaan sykkivää ääntä. AM:n äänen ominaisuuksia ovat modulaatiotaajuus f_m [Hz] ja modulaatiosyvyys D_m [dB]. Tavoitteenamme oli määrittää AM:n äänen häiritsevyys-sanktio. Psykoakustiseen kokeeseen osallistui 40 tutkittavaa. Kukin arvioi 92 äänen häiritsevyyden asteikolla 0–10. Riippumattomat muuttujat olivat f_m (7 tasoa, 0.25–16 Hz), D_m (5 tasoa, 1–14 dB), ja spektri (2 vaihtoehtoa). Kaikki AM äänet soitettiin tasolla 35 dB L_{Aeq} . Sanktio määritettiin moduloimattomien vertailuään-ten häiritsevyyden avulla. Vertailuään-ten soitettiin tasoilla 29–49 dB. Kaikki äänet olivat synteettisiä ja luotu laajakaistaisesta kohinasta. Tulosten perusteella f_m , D_m ja spektri vaikuttivat AM:n äänen häiritsevyyteen. Suurin vaikutus oli kahdella ensin mainitulla. Sanktiot vaihtelivat 0 ja +12 dB välillä. Tuloksia voidaan hyödyntää mm. sanktiomenettelyjen kehittämisessä.

1 TAVOITE

Meluohjeartvat sisältävät vakiosanktioita 3 ja 10 dB:n väliltä impulssi- ja kapeakaistamelua koskien. Sanktio k [dB] lisätään mitattuun keskiäänitasoon L_{Aeq} [dB], jolloin lopputuloksen arvioidaan heijastavan paremmin äänen häiritsevyyttä kuin pelkästään L_{Aeq} .

Amplitudimoduloitu (AM) ääni on voimakkuudeltaan sykkivää ääntä. AM:n ominaisuuksia kuvataan mm. modulaatiotaajuudella f_m [Hz] ja modulaatiosyvyydellä D_m [dB]. Edellinen kertoo, miten nopeasti ääni sykkii ja jälkimmäinen miten voimakasta sykintä on. AM:ta esiintyy meren aalloissa, sykkivässä tieliikennemelussa, tuulivoimaloissa, turbulentsissa ilmanvaihdon äänessä ja hidaskäyntisissä moottoreissa. Kaksi tutkimusta [1,2] ehdottavat, että tuulivoimaloiden AM ääni edellyttäisi sanktiointia.

Aikaisemmat AM:n äänen häiritsevyyttä koskeneet psykoakustiset kokeet [3,4,5,6,7] viittaavat, että häiritsevyys kasvaa, kun tietty D_m arvo ylitetään. Suurin osa kokeista koski spesifisti tuulivoimalaääntä. Koska AM:a ääntä esiintyy myös muualla kuin tuulivoimaloissa, on tärkeää selvittää AM:n äänen häiritsevyyttä geneerisesti. Tavoitteenamme oli määrittää jaksollisen AM:n häiritsevyys-sanktio eri f_m ja D_m arvoilla ja kahdella spektrillä.



© 2019 Valtteri Hongisto, Petra Virjonen. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Ei sovitettu –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

2 MENETELMÄT

Toteutimme psykoakustisen laboratorikokeen, johon osallistui 40 vapaaehtoista (keski-ikä 27 vuotta, 28 naista). Riippumaton muuttuja oli ääni ja riippumattomat muuttujat äänekkyys (*loudness*) ja häiritsevyys (*annoyance*). Tässä tutkimuksessa käsitellään vain jälkimmäistä. Kukin tutkittava arvioi 92 äänen häiritsevyyden ISO/TS 15666 mukaista 11-portaista asteikkoa käyttäen (0 Ei lainkaan, 10 Erittäin häiritsevää). Äänet koostuivat AM:sta äänistä ja vertailuäänistä. Vertailuääniä tarvittiin sanktion määrittämiseen. AM:t äänet muodostettiin kolmen muuttujan permutaatioina: f_m (7 tasoa, 0.25–16 Hz), D_m (5 tasoa, 1–14 dB), ja spektri (2 vaihtoehtoa). Yhteensä AM:ja ääniä oli 70 ja ne soitettiin tasolla 35 dB L_{Aeq} . Vertailuäänissä ei ollut AM:ta. Ne soitettiin 2 dB välein tasoilla 29–49 dB L_{Aeq} kummallakin spektrillä.

Äänet tuotettiin synteettisesti (Matlab). Ensin luotiin spektrit S1 ja S2 laajakaistakohinasta. Spektri S1 vastasi tuulivoimaääntä ja S2 tieliikenneääntä (Kuva 1a). Nämä kohinat toimivat kantoaaltoina AM äänille. Modulaatioindeksi m määritellään yhtälöllä

$$(1) \quad m = \frac{10^{D_m/20} - 1}{10^{D_m/20} + 1}.$$

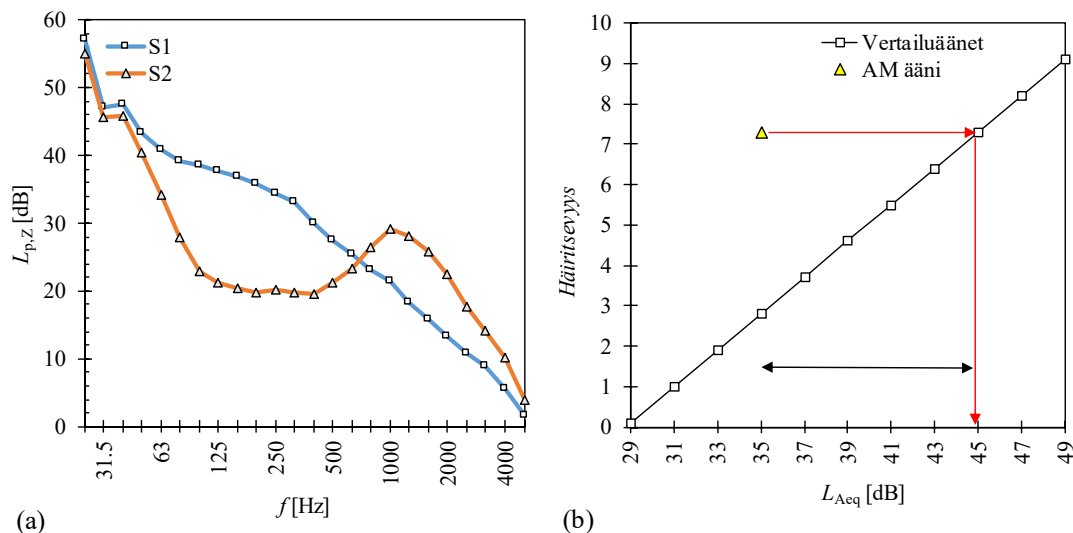
Kantoaalto kerrottiin aika-avaruudessa funktiolla Q

$$(2) \quad Q(m, t) = 1 + m \cdot \sin(2\pi f_m t)$$

jolloin sinimuotoinen AM saatiin aikaan. Aika t [s] oli diskreetti

$$(3) \quad t = (0, 1, 2, \dots, n_s - 1) \frac{1}{f_s},$$

missä n_s on näytteiden lukumäärä ja f_s [Hz] on näytteistystaajuus (44.1 kHz).

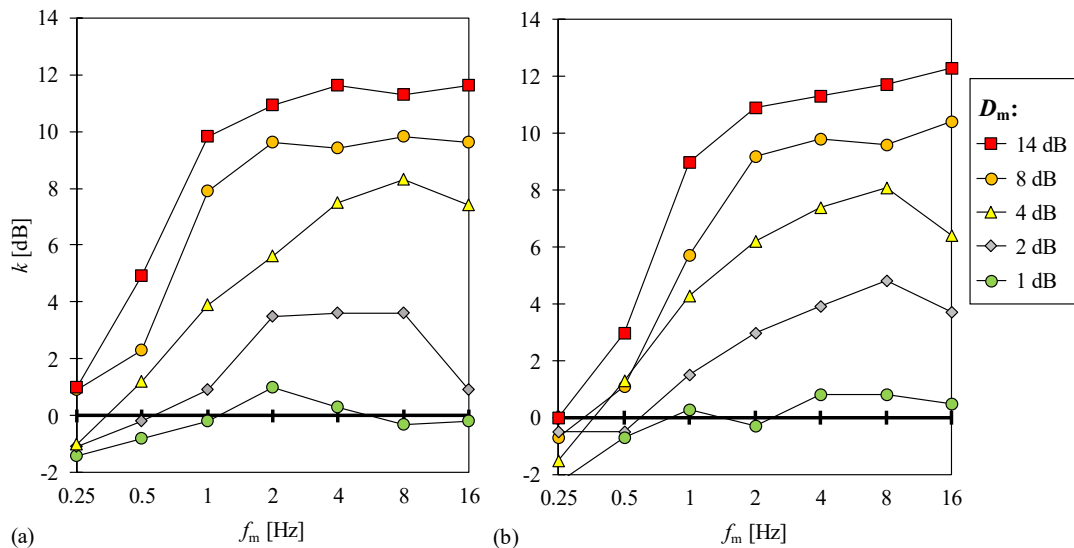


Kuva 1. (a) Spektrien S1 ja S2 painottoman äänenpainetaso, $L_{p,z}$, taajuuden f funktiona. (b) AM äänen häiritsevyyssanktion k määrittäminen. Käyrässä esitetään 40 vastaajan häiritsevyyssanktion keskiarvo vertailuäänillä. Sanktion määrittämisen esimerkkinä on AM ääni, jonka ominaisuudet olivat S1, $D_m=8$ dB ja $f_m=8$ Hz.

Koetta varten luotiin 20 sekunnin pituisia ääninäytteitä. Kutakin ääntä toistettiin, kunnes henkilö oli arvioinut sen. Äänet esitettiin terssikaistoilla 20–5000 Hz. Äänet soitettiin tutkittaville kuulokkeilla. Ennen koetta äänen ominaisuudet mitattiin yksitellen, jotta ne vastasivat muuttujien (L_{Aeq} , spektri, D_m , ja f_m) tavoitearvoja. Mittaukset tehtiin keinopäällä. Koe toteutettiin Turussa keväällä 2017 Hilja -huoneessa, jossa taustäänitaso on 21 dB L_{Aeq} . Koe koostui 12 vaiheesta. (1) Suostumuslomakkeen täyttö. (2) Alkukysely. (3) Kuulokykytesti. Kaikki olivat normaalikuuloisia. (4) Ääniin totuttelu. (5) Äänekkyuden arviointiharjoittelu. (6) Äänekkyuden arviointi joko spektrin S1 tai S2 äänille. (7) Äänekkyuden arviointi toisen spektrin äänille. (8) Lyhyt tauko. (9) Häiritsevyyden arviointiharjoittelu. (10) Häiritsevyyden arviointi joko spektrin S1 tai S2 äänille. (11) Häiritsevyyden arviointi toisen spektrin äänille. (12) Palaute ja 20 euron lahjakortin luovutus.

AM:n äänen sanktio määritettiin kuvan 1b menetelmällä. Menetelmä on kehitetty viitteissä [8] ja [9]. Sanktio k AM:lle äänelle saatiin määrittämällä vertailuäänien taso L_{Aeq} , jolla saavutettiin yhtä korkea häiritsevyyys. Muuttujien vaikutus häiritsevyyteen määritettiin ANOVALLA. Analyysi perustui 35 vastaajaan, joilla normaalijakaumaehdot täytettiin.

3 TULOKSET



Kuva 2. Häiritsevyyssanktio k modulaatiotaajuuden f_m ja modulaatiosyvyyden D_m funktiona. (a) Spektri S1. (b) Spectri S2.

ANOVALLA havaittiin tilastollisesti merkitsevä vaikutus häiritsevyyteen spektrillä ($p < 0.003$), modulaatiotaajuudella ($p < 0.001$) ja modulaatiosyvyydellä ($p < 0.001$).

Sanktiot kaikille AM:lle äänille on esitetty kuvassa 2. Suurin sanktio oli peräti 12 dB. Se havaittiin suurimmalla D_m arvolla ja f_m arvoilla 4–16 Hz. Sanktiot $k > 1.5$ dB olivat tilastollisesti merkitseviä. Tätä pienemmillä sanktioilla äänen häiritsevyyys ei poikennut merkitsevästi 35 dB:n vertailuäänien häiritsevyydestä. Sanktio kasvoi systemaattisesti, kun f_m kasvoi arvosta 0.25 Hz arvoon 2 Hz. Alueella 2–16 Hz, sanktion riippuvuus f_m :sta on pienempi. Havaitimme myös negatiivisia sanktioita, kun f_m oli pieni. Jotkut niistä olivat tilastollisesti merkitseviä. Pientaajuinen modulaatio muistuttaa meren aaltoja. Luontoon viittaavat äänet koetaan usein miellyttäväiksi. Spektrin vaikutus sanktioon oli silmämääräisesti katsoen vähäinen vaikka tilastollisesti merkitsevä.

Tutkimus on ensimmäinen, jossa selvitetään näin laajan f_m ja D_m arvojoukon vaikutuksia AM äänen häiritsevyyteen ja sanktioon. Hafke-Dys ym. [4] tutkivat f_m ja D_m vaikutusta häiritsevyyteen. Tuloksemme tukivat viitettä [4]. Sanktioita he eivät kuitenkaan laskeneet.

4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Määritimme psykoakustisen kokeen avulla sanktion k desibeleinä, joka voidaan lisätä amplitudimoduloidun äänen keskiäänitasoon L_{Aeq} , jolloin saatava korjattu äänitaso (*rating level*) kertoo paremmin äänen häiritsevyydestä kuin L_{Aeq} yksinään. Sanktio määritettiin 7x5 kokoiselle modulaatiotaajuuden ja -syvyyden matriisille. Sanktiot ylsivät jopa 12 dB:n arvoon kun nykyiset impulssi- ja kapeakaistamelun sanktiot meluohjearvoissa ovat korkeintaan 10 dB. Tuloksemme hyödyttävät amplitudimoduloidun äänen häiritsevyyden arvioinnissa ja mahdollisissa sanktiomenettelyjen kehityspyrkimyksissä.

KIITOKSET

Tutkimus oli osa Anojanssi-projektia, jota rahoittivat Business Finland, Turun ammatti-korkeakoulu, Ympäristöministeriö, Sosiaali- ja terveystieteiden ministeriö sekä yhteistyöyritykset.

VIITTEET

[1] Lotinga MJB, Perkins RA, Berry B, Grimwood CJ, Stansfeld SA (2017). A review of the human exposure-response to amplitude-modulated wind turbine noise: health effects, influences on community annoyance, methods of control and mitigation. Proc. of 12th ICBEN Congress on Noise as a Public Health Problem, June 18-22, Zurich, Switzerland.

[2] Hansen KL, Zajamsek B, Hansen CH (2018). Towards a reasonable penalty for amplitude modulated wind turbine noise. *Acoust Aust.* 46(1):21–25.

[3] Lee S, Kim K, Choi W, Lee S (2011). Annoyance caused by amplitude modulation of wind turbine noise. *Noise Con Eng J.* 59(1):38–46.

[4] Hafke-Dys H, Preis A, Kaczmarek T, Biniakowski A, Kleka P (2016). Noise annoyance caused by amplitude modulated sounds resembling the main characteristics of temporal wind turbine noise *Arch Acoust* 41(2):221–232.

[5] Ioannidou C, Santurette S, Jeong C-H (2016). Effect of modulation depth, frequency, and intermittence on wind turbine noise annoyance. *J Acoust Soc Am* 139(3):1241–1251.

[6] Schäffer B, Schlittmeier SJ, Pieren R, Heutschi K, Brink M, Graf R, Hellbrück J (2016). Short-term annoyance reactions to stationary and time-varying wind turbine and road traffic noise: A laboratory study. *J Acoust Soc Am.* 139(5):2949–2963.

[7] Schäffer B, Pieren R, Schlittmeier S, Brink M (2018). Effects of Different Spectral Shapes and Amplitude Modulation of Broadband Noise on Annoyance Reactions in a Controlled Listening Experiment. *Int J Environ Res Publ Health* 15(5):E1029.

[8] Oliva D, Hongisto V, Haapakangas A (2017). Annoyance of low-level tonal sounds – Factors affecting the penalty. *Build Environ* 123:404–414.

[9] Hongisto V, Saarinen P, Oliva D (2019). Annoyance of low-level tonal sounds – A penalty model. *Appl Acoust* 145:358-361.