

OPTIMOITU ILMAÄNENERISTÄVYYDEN PAINOTUSSPEKTRI NAAPURIMELUA VASTAAN

Petra Virjonen¹, Valtteri Hongisto¹

¹ Turun ammattikorkeakoulu
Joukahaisenkatu 3
20520 TURKU
petra.virjonen@turkuamk.fi

Tiivistelmä

Standardoituja yksilukuarvoja kuten esimerkiksi R_w , käytetään yleisesti kuvaamaan rakenteiden ilmääneneristävyttä naapurimelua vastaan (ISO 717-1:2013 ja ASTM 413:2010). Tavalliset asumisen äänet ovat spektri-kaumaltaan hyvin vaihtelevia eivätkä standardoidut yksilukuarvot edusta niitä riittävän hyvin subjektiiviselta kannalta. Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli kehittää taajuusaluetta 50 – 5000 Hz hyödyntävä yksilukuarvo, joka selittää hyvin naapurimelun aiheuttamaa häiritsevyyttä. Optimaalinen painotusspektri 6 erilaiselle naapurimelulle (erilaisia musiikkeja, lapsen itku, puhe, koiran haukunta) haettiin matemaattisen optimoinnin avulla. Lähtödatana käytettiin psykoakustista tutkimusta (Hongisto, Oliva ja Keränen 2014. Acta Acust. Acust. 100, 848–863), jossa 59 koehenkilöä oli arvioinut asumisen äänien häiritsevyyttä. Naapurimelua ennustavan painotusspektrin löytämiseksi eri äänilähteille saadut painotusspektrit keskiarvoistettiin. Saatu yksilukuarvo nimettiin $R_w + C_{opt}$:ksi. Sen painotusspektri eroaa selvästi naapurimelulle tarkoitettua painotusspektristä, $C_{50-5000}$, alle 315 Hz taajuuksilla. Ehdotettu yksilukuarvo korreloi paremmin subjektiivisen häiritsevyyden kanssa kuin mikään nykyisistä standardoiduista yksilukuarvoista (ISO 717-1 ja ASTM 413).

1 JOHDANTO

Kerrostalossa naapurista kuuluvat äänet, kuten nauru, huutaminen ja itku, televisio ja musiikki sekä eläinten äänet, koetaan häiritsevimmiksi ääniksi, erityisesti kun ympäristön melutaso on alhainen [1,2]. Huoneistojen välinen ääneneristävyys tulisi suunnitella siten, että asuinäänet vaimenevat riittävästi häiritsevyyden kannalta. Suunnittelun ja tavoitetasojen asettamisen kannalta on tärkeää, että rakenteen ilmääneneristävyttä kuvataan tunnusluvuilla, jotka korreloivat subjektiivisen häiritsevyyden kanssa. Ilmääneneristävyttä kuvataan yksilukuarvoilla, jotka helpottavat rakenteiden vertailua sekä tavoitetasojen ja vaatimusten kuvaamista. Esimerkki standardoidusta yksilukuarvosta on painotettu ilmääneneristysluku R_w [3]. On ehdotettu, että yksilukuarvon laskennassa käytettäisiin nykyisestä laajempaa taajuusaluetta, 50 – 5000 Hz [4]. Hongiston *et al.* [5] psykoakustisen tutkimuksen mukaan taajuusalue 100 – 3150 Hz voisi olla kuitenkin riittävä.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli kehittää vaihtoehtoinen ilmääneneristävyuden yksilukuarvo, joka selittäisi hyvin subjektiivisesti arvioitua äänen häiritsevyyttä erilaisille

asuinäänille. Laskennassa käytettiin psykoakustisesta laboratorikokeesta saatua dataa [5]. Yksilukuarvon painotusspektrin optimointi suoritettiin matemaattisen optimoinnin avulla taajuusalueta 50 – 5000 Hz käyttäen.

2 MATERIAALIT JA MENETELMÄT

2.1 Lähtödata

Hongiston ym. [5] laboratorikokeessa 59 koehenkilöä kuunteli erilaisia asumisen ääniä: kitaransoittoa (S1), kahta erilaista musiikkia (S2 ja S3), vauvan itkua (S4), kovaaäänistä puhetta (S5) ja koiran haukuntaa (S6). Musiikki S2 oli suodatettu vastaamaan tieliikenteen painotusspektriä, ja musiikki S3 asumismelun painotusspektriä [3]. Koeäänien oli suodatettu elektronisesti siten, että ne vaikuttivat tulevan seinän läpi. Kokeessa käytettiin yhdeksää seinäsuodatinta, jotka vastasivat erilaisia seinätyyppejä W1–W9, joiden R_w vaihteli 48 ja 75 dB:n välillä. Koeäänien taso säädettiin siten, että ne vastasivat kovaaäänistä mutta realistista äänitasoa naapurihuoneistossa. Äänen toisto tapahtui piilotettujen kaiuttimien avulla. Koehenkilöitä oli ohjeistettu kuvittelemaan olevansa kotona, kerrostaloasunnossa lukemassa kirjaa tai selaamassa internetiä kuullessaan kyseessä olevaa ääntä viereisestä asunnosta. Koehenkilöt arvioivat äänen voimakkuutta, häiritsevyyttä ja hyväksyttävyyttä tässä järjestyksessä. Vastauskaala oli 0 – 10 äänen voimakkuudelle ja häiritsevyydelle sekä 0 – 2 äänen hyväksyttävyydelle.

Optimoinnista jätettiin seinä W4 pois, sillä sen ilmaääneneristävyys oli niin korkea, etteivät heräteäänien olleet juurikaan kuultavissa. Subjektiiiviseksi parametriksi valittiin häiritsevyyden keskiarvo kullakin seinällä ja kullakin äänellä.

2.2 Optimointitehtävän muodostaminen

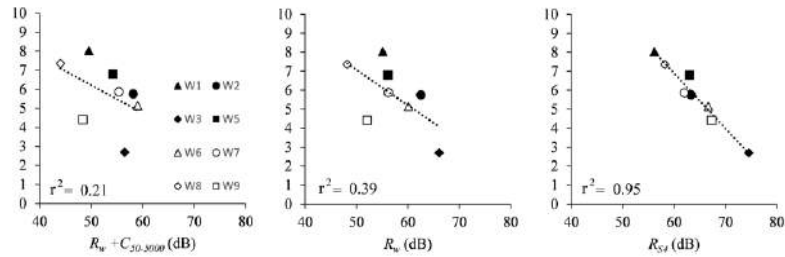
Kullekin äänilajille laskettiin oma painotusspektrinsä. Saatua yksilukuarvoja merkitään $R_w + C_{SI}$ äänelle S1 jne. Kullekin äänelle oli tavoitteena löytää sellainen painotusspektri, jolla saatu yksilukuarvo, x , korreloisi parhaiten subjektiivisen parametrin, y , kanssa. Subjektiiivisen parametrin oletettiin riippuvan yksilukuarvosta lineaarisesti, Hongiston ym. dataan perustuen [5]. R_w :n laskennassa käytetään vertailukäyrää, jota siirretään portaittain, kunnes epäsuotuisten poikkeamien summa on enintään 32 dB [3]. Optimointia varten spektripainotustermin laskenta on soveltuvampi tapa. Yksilukuarvon laskennassa käytettiin tapaa, jolla lasketaan esimerkiksi $R_w + C$ [3, 4].

$$x_i = 10 \lg \sum_{j=1}^K 10^{L_j/10} - 10 \lg \sum_{j=1}^K 10^{(L_j - R_{ij})/10} \quad (1)$$

jossa x_i on yksilukuarvo seinälle $i=1, \dots, 8$, L_j on painotusspektrin arvo terssikaistalla j , ja R_{ij} on seinän i ilmaääneneristävyys terssikaistalla j . Käytetty taajuusalue oli 50 – 5000 Hz, joten $K=21$. Painotusspektri normalisoitiin asettamalla yhtälön (1) ensimmäinen termi nol-laksi. Viereisten terssikaistojen välinen ero rajoitettiin 5 dB:iin riittävän tasaisen painotusspektrin löytämiseksi. Myös korrelaatiokertoimen neliö rajoitettiin tavoitearvoon $r^2=0.95$.

Ratkaisussa käytettiin pienimmän neliösumman menetelmää. Optimaalisen painotusspektrin L_j arvojen löytämiseksi muodostettiin epälineaarinen optimointitehtävä, jolla on sekä epäyhtälö- että yhtälörajoitteita. Optimointitehtävän muodostaminen on selostettu tarkemmin artikkelissa [6]. Optimointitehtävä ratkaistiin Matlabilla käyttämällä tehtävään soveltuva algoritmia. Algoritmin lähtöarvauksena käytettiin asuinmelulle suosittelun spektripainotustermin $C_{50-5000}$ painotusspektriä. Kullekin äänilajille löydettiin lokaali optimi.

Subjektiiivinen parametri on esitetty kuvassa 1 yksilukuarvojen $R_w + C_{50-5000}$, R_w ja R_{Sd} funktiona. Kuvasta nähdään, että lähtötilanteessa subjektiivisen parametrin arvojen vaihtelu lineaarisen sovitteikäyrän ympärillä on suurta mutta algoritmi löytää sopivat arvot painotusspektrille, jotta korrelaatio $r^2=0.95$ saavutetaan.



Kuva 1. Häiritsevyys standardoitujen $R_w + C_{50-5000}$:n ja R_w :n sekä optimoidun R_{Sd} :n funktiona äänilajille S4.

2.3 Painotuskäyrän epävarmuuden arviointi

Subjektiiivinen parametri vaihtelee merkittävästi koehenkilöiden välillä. Optimoitu painotusspektri olisi todennäköisesti hieman erinäköinen, jos koe toistettaisiin toisena päivänä tai eri koehenkilöt osallistuisivat kokeeseen. Jotta voitiin arvioida optimoidun painotusspektrin herkkyyttä subjektiivisen parametrin muutoksille, optimointi toistettiin 250 kertaa aina hieman muutetuilla subjektiivisen parametrin arvoilla. Kullakin toistolla subjektiivisen parametrin arvo valittiin satunnaisesti 95 % luottamusväiltä.

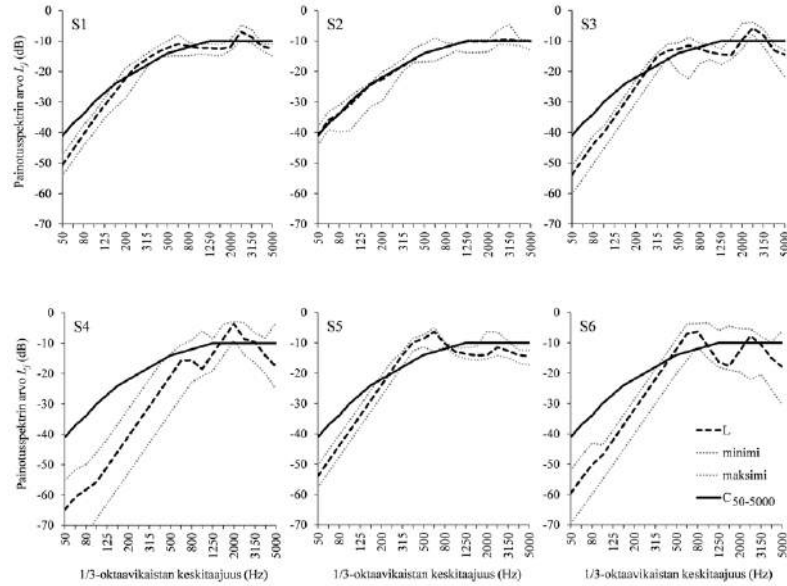
Lisäksi arvioitiin seinävalikoiman vaikutusta lopputulokseen. Painotusspektrin laskenta toistettiin jättämällä aina yksi seinä pois, ja laskemalla optimoitu painotusspektri jäljelle jääneillä seitsemällä seinällä. Näin voitiin verrata seinävalikoiman aiheuttamaa optimispektrin muutosta subjektiivisen parametrin vaihtelun aiheuttamaan muutokseen. Lopullinen painotusspektrin epävarmuus on esitetty yhdistelmänä subjektiivisen parametrin ja seinävalikoiman muutoksen vaikutuksista siten, että näistä kahdesta suurempi epävarmuus on valittu kullakin taajuudella.

3 TULOKSET

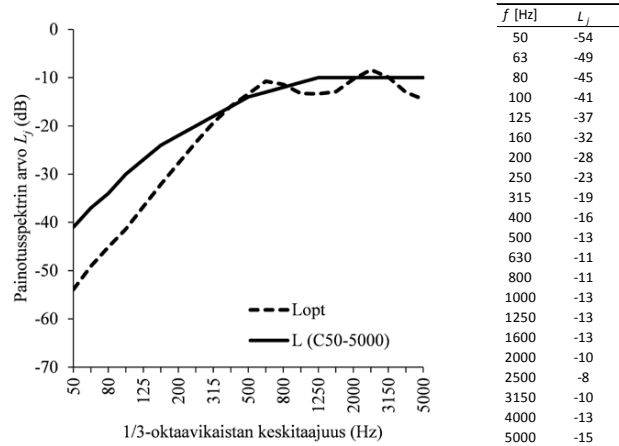
Kullekin äänilajille optimoitu painotusspektri $L_{S1} - L_{S6}$ ja epävarmuusrajat on esitetty kuvassa 2.

Saadut painotusspektrit keskiarvoistettiin, jotta saatiin yksittäisiä äänilajeja yleisempi spektri asuinmelulle. Tätä spektriä vastaavaa yksilukuarvoa on merkitty R_{opt} :lla. Ko. painotusspektri on esitetty kuvassa 3.

Korrelaatiokertoimen neliö standardoiduille ja optimoiduille yksilukuarvoille on esitetty taulukossa I kullekin äänilajille.



Kuva 2. Optimoidut painotusspektrit $L_{S1} - L_{S6}$ kullekin äänilajille S1–S6 (musta katkoviiva). Epävarmuusrajat (minimi ja maksimi) on merkitty harmailla pisteiviivoilla.



Kuva 3. Painotusspektri L_{opt} asuinmelulle. Painotusspektrin arvot kullakin terssikaistalla on esitetty oikeanpuoleisessa taulukossa.

4 POHDINTA

Optimoitu painotusspektri voitiin määrittää kullekin äänilajille. Eri äänilajien painotusspektrit eroavat toisistaan selvästi. Tästä syystä painotusspektrit eivät selitä kovinkaan hyvin muita äänilajeja kuin sitä, jolle ne ovat optimoituja (Taulukko I). Yleinen keskiarvospektri korreloi paremmin subjektiivisen parametrin kanssa kuin taulukossa I esitetyt nykyiset standardoidut yksilukuarvot viidessä äänilajissa kuudesta. On huomattavaa, että äänilajit S4 (vauvan itku) ja S6 (koiran haukunta) ovat tyypillisiä asumisen ääniä, mutta standardoiduilla yksilukuarvoilla saadut korrelaatiot ovat erittäin alhaisia. $R_w + C_{opr}$:lla saatu korrelaatio on selvästi parempi.

ISO 717-1 ohjeistaa käyttämään spektrisovitustermiä C asumismelulle. Äänilaji S3 (musiikki) oli suodatettu vastaamaan $C_{50-5000}$:n painotusspektriä, joka on muodoltaan vaaleanpunaista kohinaa. Optimoidun painotusspektrin L_{S3} :n arvot ovat matalilla taajuuksilla selvästi alempia kuin $C_{50-5000}$:n painotusspektrin (Kuva 2). Sama on havaittavissa muillakin äänilajeilla paitsi äänilajilla S2, jonka musiikki sisälsi voimakkaan bassoelementin. Vaikka epävarmuusrajat otetaan huomioon, näyttää siltä, että $C_{50-5000}$ yliarvioi matalien taajuuksien merkitystä asumismelulle.

Tässä tutkimuksessa keskiarvospektri johdettiin keskiarvoistamalla saadut optimoidut painotusspektrit. Jatkossa voisi tutkia, olisiko mahdollista löytää vielä parempi ratkaisu esimerkiksi monitavoiteoptimoinnin avulla. $R_w + C_{opt}$ toimii sellaisenaan jo melko hyvin, joten tarkempaa laskentaa ei tässä vaiheessa vielä toteutettu.

Lähtödata oli kerätty laboratoriokokoon avulla. Laboratorio-olosuhteet eivät vastaa kaikilta osin asuinolosuhteita. Optimointia varten data voitaisiin kerätä myös kenttätutkimuksen avulla. Kenttätutkimuksen haasteena ovat kuitenkin subjektiiviseen kokemukseen vaikuttavat tekijät, esimerkiksi asenne naapuria kohtaan, tutkimuksen ajankohta, äänialistuksen pituus, odotukset ääneneristävydestä sekä elämäntapa ja -tottumukset. Äänilajia ja altistusta ei voi kontrolloida. Peiteääni kussakin huoneistossa voi vaihdella. Äänen lähtöpaikka voi olla vaikea arvioida. Ilmaääneneristävyys voi vaihdella eri huoneistossa samankin talon sisällä. Laboratoriossa altistus ja koehenkilön toiminta on kontrolloitua. Vaikka koeeellinen tilanne on keinotekoinen, se on kuitenkin helpommin hallittavissa. Kenttätutkimus on kuitenkin hyödyllinen, kun määritellään ääneneristävyyden tavoitetasoja. Tavoitetasot tulisi määrittellä käyttäen yksilukuarvoja, jotka perustuvat tieteelliseen psykoakustiseen näyttöön.

Ehdotetun painotusspektrin toimivuus riippuu siitä, kuinka hyvin valitut äänilajit edustavat keskimääräistä asumismelua. On havaittu, että useimmat asumisäänet eivät sisällä korkeita äänitasoja matalilla taajuuksilla (alle 100 Hz) [1,2]. Mašović *et al.* [7] tutki laajasti asumismelua ja sen spektriä useilla eri äänilajeilla. Jatkossa spektrin lisäksi olisi hyvä tutkia, kuinka usein kukin äänilaji keskimäärin esiintyy.

Optimoidut painotusspektrit ovat melko herkkiä subjektiivisen parametrin muutoksille. Jatkossa ei ole syytä tehdä optimointispektrin määrittämistä ainakaan selvästi pienemmällä koehenkilömäärällä.

Olisi hankalaa ottaa huomioon kukin asuinmelun erilainen äänilaji erillisen painotusspektrin avulla. Tarvitaan jonkinlainen kompromissispektri. Painotusspektriä L_{opt} voisi käyttää normaaleille asumisen äänille. Painotusspektri $C_{50-5000}$ (L_{S2}) soveltuisi puolestaan hyvin tilanteisiin, joissa on tarve äänieristää voimakasta musiikkia.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Erilaisille asumisen äänille määritettiin painotusspektrit matemaattisen optimoinnin avulla. Näitä käyttäen saatiin uusi ilmaääneneristävyyden yksilukuarvo asumismelulle, R_w+C_{opt} , joka määritetään taajuusalueella 50 – 5000 Hz. Tämän painotusspektri, L_{opt} , eroaa selvästi painotusspektristä $C_{50-5000}$ alle 315 Hz taajuuksilla. Ehdotettu yksilukuarvo korreloi paremmin subjektiivisen häiritsevyyden kanssa kuin mikään standardoituista ISO 717-1:n yksilukuarvoista asuinmelulle. Tulokset [6] on saatettu ISO 717-1 standardista vastaavan työryhmän WG 18 tietoon.

Taulukko I. Korrelaatiokertoimen neliö r^2 yksilukuarvojen ja subjektiivisen parametrin välillä kullakin äänilajilla S1–S6.

	Standardoidut yksilukuarvot						Optimoituid yksilukuarvot						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S1	S2	S3	S4	S5	S6	
$R_w+C_{50-5000}$	0.72	0.94	0.50	0.14	0.42	0.15	R_w+C_{s1}	0.95	0.76	0.84	0.40	0.86	0.54
R_w	0.90	0.69	0.79	0.14	0.86	0.53	R_w+C_{s2}	0.71	0.95	0.49	0.14	0.40	0.14
$R_w+C_{50-3150}$	0.72	0.93	0.50	0.14	0.42	0.15	R_w+C_{s3}	0.98	0.66	0.95	0.58	0.94	0.69
$R_w+C_{100-3150}$	0.86	0.78	0.68	0.24	0.71	0.36	R_w+C_{s4}	0.67	0.34	0.80	0.95	0.63	0.74
57C	0.93	0.70	0.81	0.42	0.86	0.57	R_w+C_{s5}	0.80	0.45	0.75	0.38	0.95	0.73
							R_w+C_{s6}	0.72	0.32	0.82	0.68	0.92	0.95
							R_w+C_{opt}	0.96	0.66	0.92	0.57	0.94	0.74

KIITOKSET

Tutkimus toteutettiin käyttäen dataa, joka kerättiin ÄKK-projektin aikana (2012–2014). Projektia rahoittivat Tekes, ympäristöministeriö ja kahdeksan yritystä.

VIITTEET

- [1] Hongisto V, Mäkilä M, Haapakangas A, Hakala J, Hyönä J, Kylliäinen M, Acoustic satisfaction in multi-storey buildings built after 1950 – preliminary results of a field survey, Proc INTER-NOISE 2013, 15-18 September 2013, Innsbruck, Austria 2013.
- [2] Hongisto V, Mäkilä M, Suokas M, Satisfaction with sound insulation in residential dwellings – The effect of wall construction. Build Environ, 85(2015), 309–320.
- [3] ISO 717-1 (2013), Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2013
- [4] Scholl W, Lang J, Wittstock J, Rating of sound insulation at present and in future. The revision of ISO 717, Acta Acust. united Ac, 97(2011), 686–698.
- [5] Hongisto V, Oliva D, Keränen J, Subjective and objective rating of airborne sound insulation – Living sounds, Acta Acust. Acust. 100(2014), 848–863.
- [6] Virjonen P, Hongisto V, Oliva D, Optimized single-number quantity for rating the airborne sound insulation of constructions: Living sounds, J. Acoust. Soc. Am. 140(2016), 4428–4436.
- [7] Mašović D B, Šumarac Pavlović D S, Mijić, M M, On the suitability of ISO 16717-1 reference spectra for rating airborne sound insulation, J. Acoust. Soc. Am. 134(2013), EL420–EL425.