EQ

Vesa Välimäki, Juho Liski ja Jussi Rämö

Aalto-yliopisto, Akustiikan laboratorio, Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos
Otakaari 5, 02150 Espoo
etunimi.sukunimi@aalto.fi

Tiivistelmä

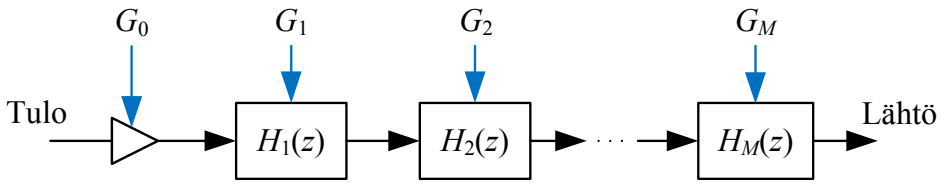
Ekvalisointia käytetään akustiikassa ja audiotekniikassa laajasti esimerkiksi äänentoistojärjestelmän taajuusvasteen korjaamiseen. Ekvalisaattorien (EQ) suunnittelu on kehittynyt paljon viime vuosina. Tässä artikkelissa keskitymme graafisiin ekvalisaattoreihin, joiden suunnittelu on haastavaa. Esittelemme kaksi periaatetta ekvalisaattorin toteuttamiseen, peräkkäis- ja rinnaisrakenteen. Kehittämämme uusimmat graafiset ekvalisaattorit täyttävät kriittisen hifi-vaatimuksen, jonka mukaan taajuusvasteen tulee vastata asetuksia yhden desibelin tarkkuudella. Graafisen ekvalisaattorin peräkkäisrakenteessa se onnistuu valitsemalla tarkoituksenmukainen parametrinen suodin jokaiselle kaistalle, säätämällä niiden kaistanleveys siten, että vahvistuksen vaikutus viereisille kaistoille tunnetaan, ja ratkaisemalla kaistasuotimien vahvistukset pienimmän neliösumman menetelmällä. Tarkka ja tehokas rinnakkainen graafinen ekvalisaattori saadaan muuntamalla peräkkäisrakenne viivästettyyn rinnakkaismuotoon, joka on uutuus tällä alalla. Koska näillä menetelmillä suunniteltujen oktaavi- ja terssiekvalisaattorien parametrien päivitys vaatii paljon laskentaa, olemme korvanneet vahvistusten optimoinnin keinotekoisen hermoverkon avulla. Kehittämiemme menetelmien ansiosta graafisen oktaavi- ja terssiekvalisaattorin suunnitteluongelma on nyt käytännössä ratkaistu.

1 JOHDANTO

Ekvalisaattorilla (engl. equalizer, EQ) tarkoitetaan tyypillisesti laitetta/järjestelmää, jolla käyttäjä voi säätää yhtä, kahta tai kolmea suodinparametria [1]. Nämä ovat keskitaajuus, vahvistus/vaimennus (yleensä desibeleinä) ja Q-arvo (kaistanleveys). Graafisessa ekvalisaattorissa näistä parametreistä vain vahvistus on käyttäjän säädettävissä. Tyypillisesti graafisen ekvalisaattorin keskitaajuudet valitaan tasavälein logaritmisella taajuusasteikolla ja niiden vahvistusta ohjataan vierekkäisillä liukusäätimillä, jotka siten kuvaavat järjestelmän taajuusvastetta eli vahvistusta taajuuden funktiona. Tästä syystä graafinen ekvalisaattori on intuitiivinen käyttäjälle.

Useimmat graafiset ekvalisaattorit eivät toimi oletetusti, sillä niiden taajuusvaste ei vastaa kovin tarkasti säätimien asetuksia. Taajuusvasteen virheet syntyvät, kun vierekkäiset

Copyright ©2019 Vesa Välimäki, Juho Liski ja Jussi Rämö. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –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.



Kuva 1: *Sarjamuotoinen graafinen ekvalisaattorirakenne, jossa kytketään M kaistasuodatinta peräkkäin. Parametrit G_m ovat suodattimien lineaariset vahvistukset.*

suotimet vuorovaikuttavat keskenään [2, 3]. Sarjaankytkettyjen suotimien vahvistukset desibeleinä summautuvat, ja usein ekvalisaattorin kokonaisvaste on paljon suurempi tai pienempi kuin odotetaan. Tästä syystä tarkan ekvalisaattorin toteuttaminen vaatii suodinvahvistusten optimointia, joka on riippuvainen käyttäjän valitsemista asetuksista, joita kutsutaan komennoiksi [3, 1]. Työmme ekvalisaattorien parissa on keskittynyt sekä suotimien että suodinvahvistusten optimointiin, jotta graafisella ekvalisaattorilla saavutettaisiin alle yhden desibelin kokonaisvirhe [4, 5].

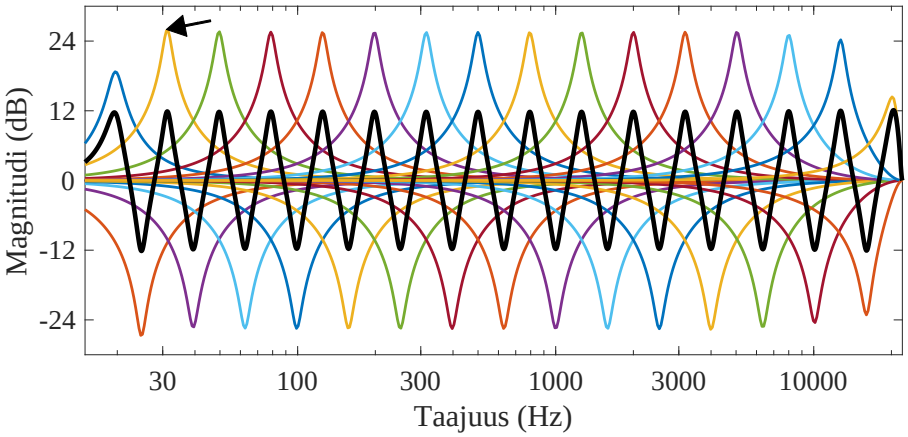
Tämän artikkelin rakenne on seuraavanlainen. Kappaleessa 2 kuvataan uusi periaate, jolla voidaan suunnitella tarkka sarjamuotoinen graafinen ekvalisaattori. Kappaleessa 3 kerrotaan kuinka graafinen ekvalisaattori voidaan muuntaa rinnakkaismuotoiseksi. Kappaleessa 4 kuvataan kuinka suodinvahvistusten optimointi voidaan korvata hermoverkon avulla, joka yksinkertaistaa ja nopeuttaa ekvalisaattorin parametrien säätöä. Kappaleessa 5 esitetään yhteenveto ja tulevaisuudensuunnitelmat.

2 SARJAMUOTOISEN EKVALISAATTORIN SUUNNITTELU

Kuva 1 näyttää kaskadi- eli sarjamuotoisen graafisen ekvalisaattorin rakenteen. Jokainen kaistasuodin $H_m(z)$, missä $m = 1, 2, ...M$, on parametrinen ekvalisaattori, joka tekee keskitaajuutensa ympärille tietyn levyisen vahvistuksen tai vaimennuksen. Kaukana keskitaajuudesta parametrisen ekvalisaattorin vahvistus lähenee nollaa desibeliä. Kuitenkin kaistasuodattimet vaikuttavat toistensa taajuusalueilla jonkin verran, ja juuri tämä vaikeuttaa graafisen ekvalisaattorin tarkkaa suunnittelua.

Tarkka peräkkäismuotoinen graafinen ekvalisaattori opittiin suunnittelemaan yhdistämällä Abelin ja Bernersin [6] ehdottama desibelivahvistusten optimointi ja Orfanidisin [7] parametrinen EQ-rakenne. Orfanidiksen suodattimessa kaistanleveys voidaan määrittää halutulla tavalla, ja päädyimme määrittämään sen desibelivahvistuksen murto-osan mukaan [4]. Yleensä resonanssin kaistanleveys määritellään -3 dB:n kohdalta huipun eri puolilta [1], mutta tässä tapauksessa se ei ole tarkoituksenmukaista. Tarkin tulos saadaan, kun vahvistus kaistanleveydellä on oktaaviekvalisaattorissa $0.3g$ [4] ja terssiekvalisaattorissa $0.4g$ [5], missä g on parametrisen suodattimen vahvistus desibeleinä keskitaajuudella. Vahvistuksen optimointi suoraan desibeleinä johtaa siihen, että graafinen ekvalisaattori toimii symmetrisesti positiivisilla (korostus) ja negatiivisillä vahvistuksilla (vaimennus). Tämä ei muuten tapahtuisi automaattisesti.

Kuvassa 2 näytetään suunnitteluesimerkki, kun tavoitevaste on siksak-asetus, jossa peräkkäiset tavoitevahvistukset ovat 12 dB ja -12 dB. Kaistasuodattimien vahvistusten on



Kuva 2: *Sarjamuotoisen ekvalisaattorin kokonaisvaste (musta paksu viiva) ja kaistasuodattimien vasteet (värikkäät viivat) siksak-asetuksella. Nuoli osoittaa suurimman kaistasuodattimet vahvistuksen, joka 26 dB.*

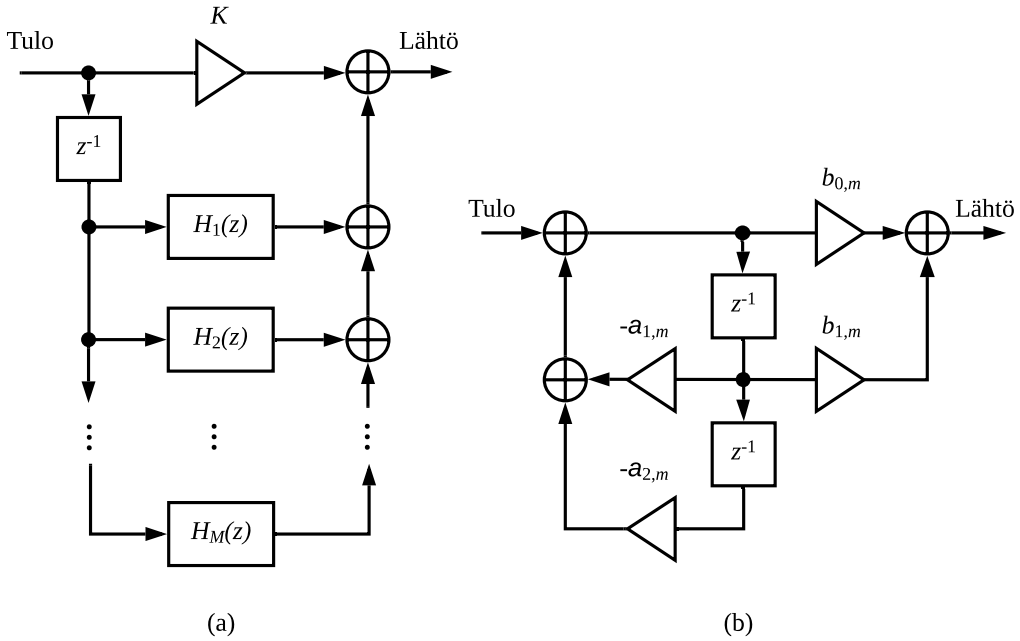
oltava paljon suuremmat kuin ± 12 dB, jotta viereisten suodattimien aiheuttama vuorovaikutus saadaan kumottua. Nämä suodinvahvistukset ratkaistaan pienimmän neliösumman optimoinnilla [4, 5].

3 PERÄKKÄISSUODATTIMEN MUUNTAMINEN RINNAKKAISEKSI

Rinnakkaismuotoisen graafisen ekvalisaattorin tarkka suunnittelu on osoittaunut vaikeaksi [2, 1]. Olemme esittäneet aiemmin suunnittelumenetelmän, jossa tarvitaan kaksinkertainen määrä suodattimia keskitaajuuksiin verrattuna ja näin saavutetaan yhden desibelin tarkkuus [2]. Ilman välisuodattimia riittävää tarkkuutta ei toistaiseksi ole saavutettu. Ilmeisesti epätarkkuutta aiheuttaa vaihevasteen määrittely, joka on välttämätön rinnakkaissuunnitelussa, koska kokonaisvaste koostuu suodattimien kompleksisten taajuusvasteiden (vahvistus ja vaihe) yhteenlaskusta [1].

Tarkka ja tehokas rinnakkainen graafinen ekvalisaattori saadaan muuntamalla peräkkäisrakenne viivästettyyn rinnakkaismuotoon, joka esitetään kuvassa 3 [8]. Muuntaminen on helppoa uuden algoritmimme avulla, jossa peräkkäisrakenteen vahvistus ja navat siirretään suoraan rinnakkaisrakenteeseen ja rinnakkaissuodattimien yhdistämiseen tarvittavat kertoimet ratkaistaan osamurtokehitelmän avulla.

Kuvan 1 rakenteesta voidaan suoraan sijoittaa vahvistus G_0 viivästettyyn rakenteeseen: $K = G_0$. Kertoimet $a_{1,m}$ ja $a_{2,m}$ ovat täsmälleen samat kuin kuvan 1 kaistasuodattimissa. Kuvan 3 viivästetyn rakenteen kertoimet $b_{0,m}$ ja $b_{1,m}$ ratkaistaan Heavisiden peittomenetelmällä [8]. Näin vältetään ns. pitkä polynomien jakolasku, jota yleensä tarvitaan osamurtokehitelmässä. Lopputuloksena saatu rinnakkaissuodin on erittäin suurella tarkkuudella samanlainen kuin sarjasuodin, josta se on muunnettu [8]. Tällä hetkellä tämä on helpoin ja tarkin tapa suunnitella rinnakkainen graafinen ekvalisaattori. Rinnakkaisrakenne soveltuu hyvin toteutettavaksi moderneilla prosessoreilla, joissa käytetään paljon rinnakkaisuutta laskennassa.



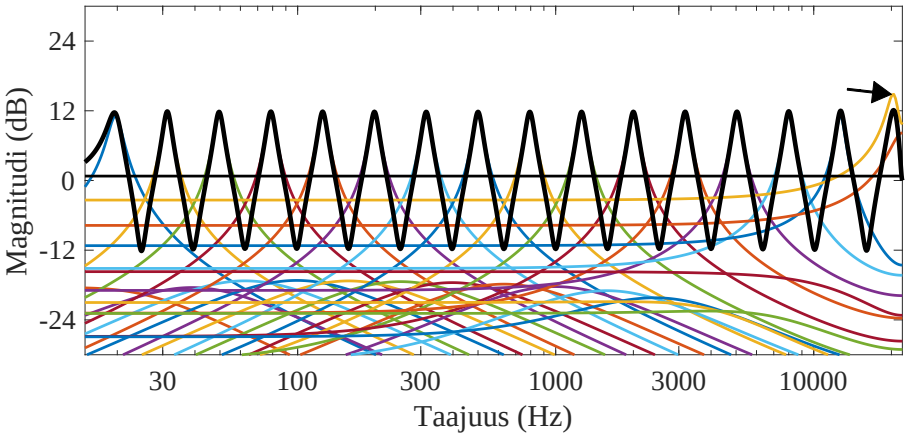
Kuva 3: *(a) Graafisen EQ:n viivästetty rinnakkaisrakenne, jossa kaistasuodattimiin menevää tulosignaalia viivästetään yhdellä näytteellä (lohkossa z^{-1}) ja (b) jonka kaistasuodattimet $H_m(z)$ ovat toista astetta, mutta niiden myötäkytketty osa on ensimmäistä astetta. Laskentakuorma on sama kuin kuvan 1 sarjamuotoisessa EQ:ssa.*

Kuva 4 näyttää suunnitteluesimerkin, missä kuvan 2 sarjamuotoinen ekvalisaattori on muutettu viivästettyyn rinnakkaismuotoon. Näiden kahden suodattimen taajuusvasteet ovat tarkalleen samat, vaikka kaistasuodattimet ovat kovin erilaiset. Rinnakkaissuodattimen etuja ovat soveltuvuus rinnakkaislaskentaan ja kaistasuodattimien pienempi dynamiikka, mikä nähdään esimerkissämme kuvan 4 kaistasuodattimien pienempinä vahvistuksina kuin kuvassa 2.

4 VAHVISTUKSEN LASKEMINEN HERMOVERKON AVULLA

Koska uusilla menetelmillämme suunniteltujen oktaavi- ja terssiekvalisaattorien parametrien päivitys vaatii paljon laskentaa, olemme yksinkertaistaneet vahvistusten optimointia keinotekoisen hermoverkon avulla [9, 10]. Perinteinen monitasoinen perceptron-hermoverkko soveltuu tähän tarkoitukseen erinomaisesti.

Hermoverkkoa opetetaan näyttämällä sille paljon esimerkkejä käyttäjän asetuksista ja niitä vastaavista optimoiduista suodinvahvistuksista [9, 10]. Samalla hermoverkon parametrejä eli painoja säädetään opetusalgoritmin avulla. Opetuksen aikana hermoverkko kokeilee mitkä suodinvahvistukset tulevat sen nykyisillä painokertoimilla, ja opetusalgoritmi korjaa toteutuneen virheen perusteella painoja siten, että jatkossa virhe on pienempi. Kun opetusdataa eli vahvistuskerroinvektoripareja on riittävästi ja opetusta jatketaan riittävän kauan, virhe saavuttaa minimin. Jos verkon kuvauskysy riittää ongelman oppimiseen eli siinä on riittävästi neuroneja ja kerroksia, optimointi voidaan korvata hermo-



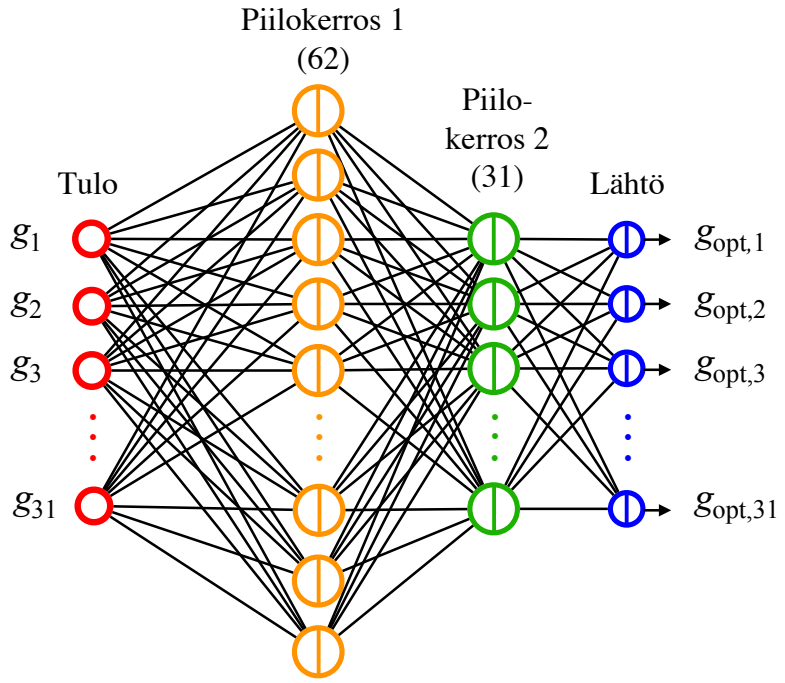
Kuva 4: *Rinnakkaismuotoisen graafisen ekvalisaattorin taajuusvaste (musta paksu käyrä), vahvistus K (musta ohut vaakaviiva) ja kaistasuodattimien vasteet (värikkäät viivat). Suodin on muunnettu kuvan 2 sarjasuodattimesta, jolla on identtinen vaste. Kaistasuodattimien vasteet sen sijaan ovat erilaiset, ja nuolen osoittama kaistasuodattimen suurin vahvistus on nyt 15 dB eli paljon pienempi kuin sarjamuotoisessa ekvalisaattorissa.*

verkolla. Ekvalisaattoria käytettäessä hermoverkon parametrejä ei enää muuteta, vaan ne lukitaan parhaisiin arvoihin, jotka löydettiin opetuksen aikana.

Kokeilumme erikokoisilla perceptron-verkoilla johtivat riittävän suurten mutta mahdollisimman pienten verkkojen löytymiseen, joilla oktaavi- ja terssiekvalisaattorin kertoimet voidaan ennustaa riittävän tarkasti. Oktaaviekvalisaattorin tapauksessa virhe pysyy 1 dB:n sisällä, kun perceptron-verkossa on yksi piilokerros, jossa on 20 neuronia. Tämä on jostain syystä täsmälleen kaksinkertainen määrä oktaavikaistojen määrään nähden, koska niitä on 10 [9]. Terssiekvalisaattorin tapauksessa tarvitaan kaksi piilokerrosta, joista ensimmäisessä on 62 ja toisessa 31 neuronia. Tämän verkon rakenne näytetään kuvassa 5. Terssiekvalisaattorissa on 31 kaistaa, joten tälläkin kertaa ensimmäisen piilokerroksen koko on kaksinkertainen kaistojen määrään nähden [10]. Tälle suhdeluvulle ei toistaiseksi ole keksitty selitystä.

Hermoverkon etuja suodinvahvistusten laskennassa ovat yksinkertaisuus ja nopeus. Kertoimien laskenta hermoverkolla vaatii ainoastaan matriisikertolaskuja ja hyperbolisen tangenttifunktion, mikä on paljon helpompaa ohjelmoida kuin aiemmin kehittämämme pienimmän neliösumman menetelmään perustuva optimointialgoritmi [9]. Hermoverkko laskee Matlabissa suodinkertoimet oktaaviekvalisaattorille yli 200 kertaa optimointia nopeammin [9] ja terssiekvalisaattorille yli 350 kertaa nopeammin [10].

Kuvassa 6 näytetään terssiekvalisaattorin testauksessa yleinen siksak-asetus (punaiset ympyrät) ja siihen sovitettu sarjamuotoisen graafisen EQ-suodattimen taajuusvaste (musta käyrä). Pienet neliöt ovat optimointialgoritmin antamat suodinvahvistukset ja rastit ovat hermoverkon ennustamat suodinvahvistukset. Koska rastit sattuvat neliöihin, hermoverkon antamat luvut vastaavat tarkasti optimoinnin tuloksia. Hermoverkosta aiheutuu vähäinen approksimaatiovirhe, joka ei käytännössä huononna EQ:n tarkkuutta. Tässä testissä suurin vahvistusvirhe 1 dB sattuu alimmalla terssikaistalla, joka on kuuloalueen alarajalla.



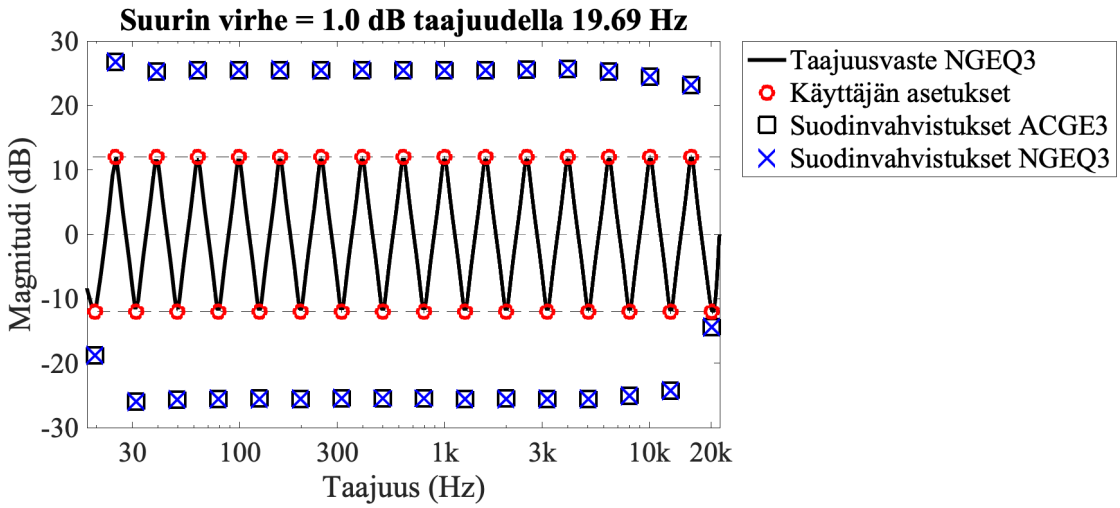
Kuva 5: *Kahden piilokerroksen perceptron-hermoverkko 31-kaistaisen graafisen ekvalisaattorin suodinvahvistusten $g_{\mathrm{opt},m}$ ennustamiseen komentovahvistusten g_m perusteella. Kaikki vahvistukset ovat desibeleinä.*

Kuva 7 on vastaavan testin tulos satunnaisilla asetuksilla, jotka muistuttavat tyypillistä EQ:n käyttöä paremmin kuin ääriasetukset. Nyt suurin virhe on vain alle 0,5 dB, jonka ei uskota olevan korvin kuultavissa.

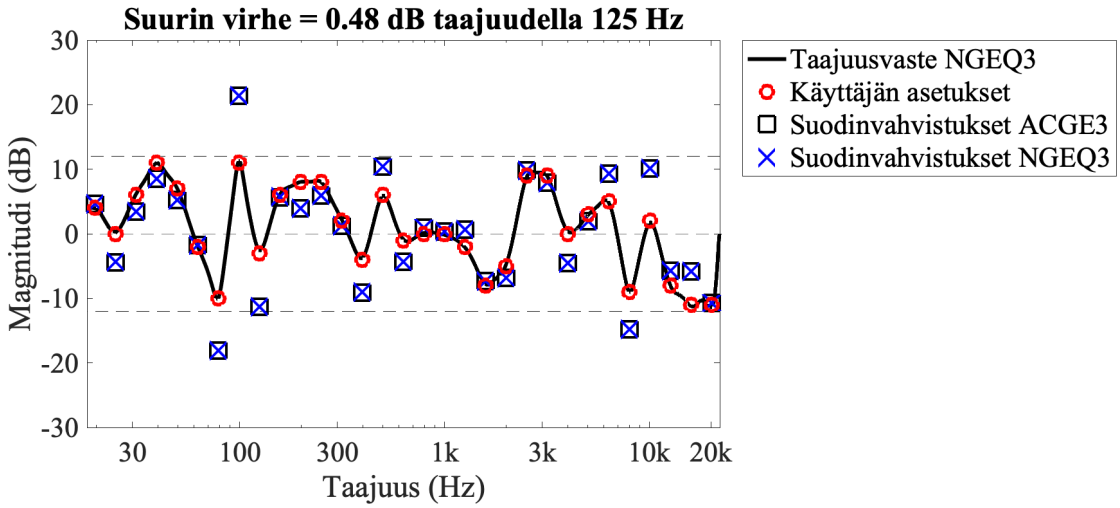
5 YHTEENVETO

Graafinen ekvalisaattori osataan nyt suunnitella tarkasti, kun suodattimien keskitaajuudet sijoittuvat tasavälein logaritmiselle taajuusakselille oktaavin tai terssin välein. Peräkkäisrakenteen suunnittelu on nopeinta perinteisen hermoverkon avulla, joka ennustaa kaistasuodattimien vahvistukset asetuksista. Rinnakkaisrakenne kannattaa suunnitella muuntamalla se peräkkäisrakenteesta, koska muuten sen suunnittelu on haastavaa. Esittämämme moderni rinnakkainen graafinen ekvalisaattori perustuu viivästettyyn rakenteeseen, jossa useat kerroinarvot voidaan lainata suoraan peräkkäissuotimesta ja loput ratkaistaan Heavisiden peittomenetelmällä. Uusimmat menetelmät graafisen ekvalisaattorin suunnitteluun, kuten kaistasuodattimien vaihtaminen symmetrisiksi [11], voidaan helposti opettaa hermoverkolle, jolloin kaistojen vahvistusten säätö on helppoa ja nopeaa.

Jatkossa esitettyjä menetelmiä pyritään laajentamaan muihin kaistajakoihin kuin logaritmisiin taajuusasteikkoihin, kuten auditoriseen Bark-asteikkoon. On mielenkiintoista pohtia voidaanko samoja periaatteita soveltaa yleisesti parametristen ekvalisaattoreiden yhteydessä, kun vahvistuksen lisäksi myös jokaisen suodattimen keskitaajuus ja kaistanleveys ovat vapaasti käyttäjän säädettävissä.



Kuva 6: *Siksak-testissä verrataan pienimmän neliösumman menetelmällä (ACGE3) ja hermoverkolla (NGEQ3) saatuja suodinvahvistuksia sarjamuotoisessa graafisessa terssiekvalisaattorissa. Hermoverkon ennustamat suodinvahvistukset ovat lähes samat kuin optimoinnin antamat. Lopullinen taajuusvaste on laskettu hermoverkon antamilla suodinvahvistuksilla, ja maksimivirhe pysyy 1 desibelin puitteissa.*



Kuva 7: *Kuvaa 6 vastaava testi satunnaisilla asetuksilla. Satunnaistestit paljastavat, että suurin taajuusvastevirhe on tyypillisesti pienempi kuin yksi desibeli.*

6 KIITOKSET

Juho Liskin työtä rahoittaa Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulun tohtoriohjelma (Aalto ELEC Doctoral School). Tämä tutkimus liittyy NordicSMC-hankkeeseen (“Nordic Sound and Music Computing Network”, NordForsk-projekti nro. 86892).

VIITTEET

[1] V. Välimäki and J. D. Reiss. All about audio equalization: Solutions and frontiers. *Applied Sciences*, 6(129/5):1–46, May 2016. Open Access -julkaisu: https://www.mdpi.com/2076-3417/6/5/129.

[2] J. Rämö, V. Välimäki, and B. Bank. High-precision parallel graphic equalizer. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech and Language Processing*, 22(12):1894–1904, December 2014. Saatavana osoitteesta: https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/14206/article7.pdf.

[3] R. J. Oliver and J.-M. Jot. Efficient multi-band digital audio graphic equalizer with accurate frequency response control. In *Proceedings of the 139th Convention of the Audio Engineering Society*, New York, New York, USA, October 2015.

[4] V. Välimäki and J. Liski. Accurate cascade graphic equalizer. *IEEE Signal Processing Letters*, 24(2):176–180, February 2017.

[5] J. Liski and V. Välimäki. The quest for the best graphic equalizer. In *Proceedings of the International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-17)*, pages 95–102, Edinburgh, UK, September 2017. Open Access -julkaisu: http://www.dafx17.eca.ed.ac.uk/papers/DAFx17_paper_94.pdf.

[6] J. S. Abel and D. P. Berners. Filter design using second-order peaking and shelving sections. In *Proc. International Computer Music Conference (ICMC-04)*, Miami, Florida, USA, November 2004. Open Access -julkaisu: https://quod.lib.umich.edu/i/icmc/bbp2372.2004.152/1.

[7] S. J. Orfanidis. *Introduction to Signal Processing*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1996. URL https://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/intro2sp/.

[8] J. Liski, B. Bank, J. O. Smith, and V. Välimäki. Converting series biquad filters into delayed parallel form: Application to graphic equalizers. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 67(14):3785–3795, July 2019. Open Access -julkaisu: https://ieeexplore.ieee.org/document/8723568.

[9] V. Välimäki and J. Rämö. Neurally controlled graphic equalizer. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech and Language Processing*, hyväksytty julkaistavaksi, 2019. Open Access -julkaisu: https://ieeexplore.ieee.org/document/8809819.

[10] J. Rämö and V. Välimäki. Neural third-octave graphic equalizer. In *Proceedings of the International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-19)*, Birmingham, UK, September 2017. Open Access -julkaisu: https://www.researchgate.net/publication/335740795_Neural_Third-Octave_Graphic_Equalizer.

[11] J. Liski, J. Rämö, and V. Välimäki. Graphic equalizer design with symmetric biquad filters. In *Proceedings of the IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA-19)*, New Paltz, New York, USA, October 2019.