



Aalto-yliopisto  
Sähkötekniikan  
korkeakoulu

ELEC-C5341  
Äänen- ja puheekäsittely

## Kaiuttimen kalibointi

Kasperi Kaivola	792415
Juho Kerminen	898461
Otso Luukkanen	792305
Aino Valkama	883023

# Kaiuttimen kalibrointi

Kasperi Kaivola  
Juho Kerminen  
Otso Luukkanen  
Aino Valkama

## Tiivistelmä

*Tyypillinen kaiutin on suunniteltu taajuusvasteeltaan tasaiseksi ideaalissa, kaiuttomassa huoneessa. Tyypillinen kuunteluymäristö ei kuitenkaan ole ideaali kaiuton tila. Tällainen epäideaali tila sisältää epäsymmetrisiä heijastavia pintoja, jotka vaimentavat joitakin taajuuksia ja vahvistavat taas toisia kuuntelijan sijainnista riippuen. Projektimme pyrkii tasoittamaan taajuusvasteen epäideaalissa ympäristössä johonkin havaintosijaintiin.*

## 1 Johdanto

Pyrimme tasoittamaan kaiuttimen taajuusvasteen epäideaalissa ympäristössä johonkin tiettyyn kuuntelupisteeseen niin, että taajuudet kuuluisivat mahdollisimman tasaisesti. Tavoite on ensin kalibroida kaiutin ideaalissa kaiuttomassa huoneessa. Tämä mahdollistaa kaiuttimen ominaisuuksien arvioinnin ennen varsinaista mittausta [3], minkä jälkeen mittaus ja kalibrointi voidaan toistaa epäideaalissa ympäristössä. Ero äänessä on tarkoitus havaita sekä kuuntelemalla, että mittaanalla kalibroitu kaiutin.

## 2 Metodit

### 2.1 Mittaukset

Aluksi mittaamme kaiuttimen taajuusvasteen kaiuttomassa huoneessa. Mitataan ensin kaiuttomassa huoneessa varmistamme spesifikaation paikkansapitävyyden. Tämä on tärkeää, sillä kaiuttimen vaurioitumista välittääksemme emme halua väkisin yrittää vahvistaa taajuuksia, joita se ei kykene soittamaan. On myös tärkeää tietää, mikäli testikaiutin on suunniteltu huo-nosti, jolloin sen taajuusvaste olisi hyvin epätasainen myös kaiuttomassa huoneessa.

Äänitykset toteutetaan ilmaisella Room EQ Wizard-ohjelmistolla. Ohjelmistosta saa näppärästi ulos impulssivasteen, joka tarvitaan ekvalisointiin.

### 2.2 Ekvalisointi

Suunnitelmana on ekvalisoida ääni sen taajuusvasteen perusteella luotujen bandpass-suodattimien avulla. Impulssivasteen diskreettiaikainen taajuusvaste lasketaan (kaava 1), joka ilmaisee eri äänitaajuuksien magnitudin.

Magnitudivaste muutetaan desibelitasoon (kaava 2). Tämän vastaluku lasetaan, jotta saadaan lopullisen suodattimen taajuusvaste. Tätä käytetään muodostamaan FIR-suodattimen kertoimet, jotka Equalizer APO -ohjelma lukee tiedostosta. Lopputuloksena on tarkoitus olla reaalialkainen suodatus, jonka Equalizer APO toteuttaa ohjelmamme automaattisesti laskemien FIR-suodattimen kertoimien avulla.

### 2.2.1 Kaavat

$$X_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \cdot e^{i2\pi k \frac{n}{N}}, n \in \mathbb{Z} \quad (1)$$

$$X_{dB} = 20 \cdot \log_{10}(X_{dB}) \quad (2)$$

### 2.2.2 Pseudokoodi ekvalisoinnille

```
Pseudo code
algorithm norm is
    v: Vector x in dB scale
    i: index that that is used as a reference , will be 0 (in dB scale)
    output: Vector y that is the vector x normalized to
    y = v - v(i)
    return y

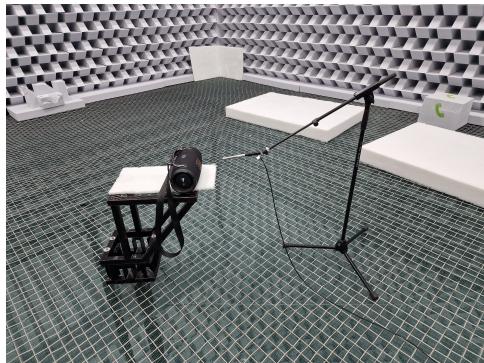
algorithm equalization-inverse-frequency-response is
    input: Vector x that is an impulse response
    input: Fs that is the sampling frequency of the impulse response
    input: norm_f that is the reference frequency used for normalization
    output: Vector y that is the inverse of x in frequency domain

    X = fft(x)
    X = abs(X)
    X_db = 20 * log_10(X)
    i = floor(length(X)/2/((Fs/2)/f_norm));
    X_db_norm = norm(X_db, i)
    (Note: X_db_norm+(-X_db_norm)= [0,0,0,0,...,0,0]
    X_inverted_norm = 10^(-X_db_norm)
    y = ifft(X_inverted_norm)
    return y
```

## 3 Toteutus

### 3.1 Mittaukset

Työn toteutus alkoi ensimmäisellä äänityksellä. Kalibroitavaksi kaiuttimeksi valittiin JBL Xtreme3-kaiutin, jonka taajuusalueeksi JBL lupaa 53.5 - 20 000 hertsiä. Äänitimme JBL Xtreme3-kaiuttimella soitetun taajuuspyyhkäisyn Room EQ Wizard-ohjelmalla Aallon akustiikan laboratorion kaiuttomassa huoneessa 1. Ohessa (1) kuvia mittausasetelmasta.



(a) Kokonaisuus



(b) Mikrofoni noin 10 cm päässä kaiuttimesta

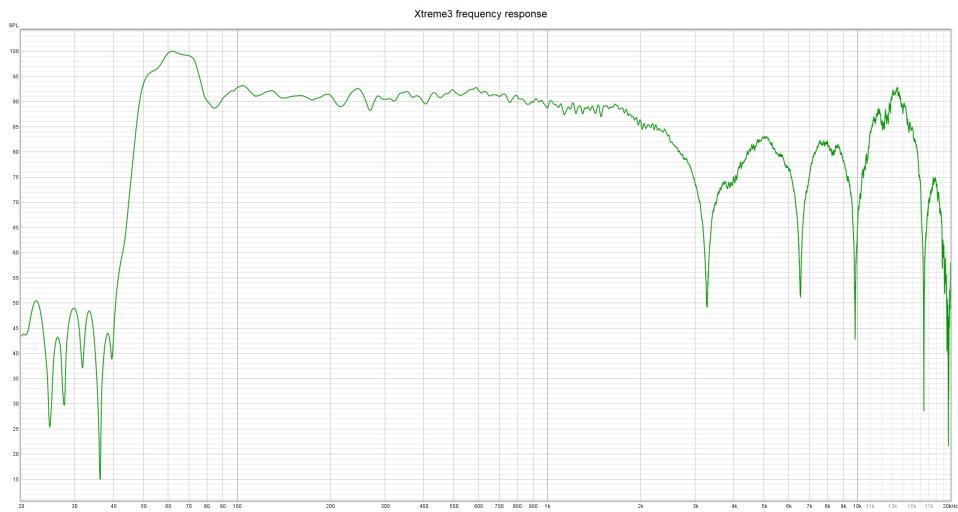


(c) Mikrofoni noin 250 cm päässä kaiuttimesta

Kuva 1: Kaiuttonman tilan mittausasasetelma (1a), etäisyys ensimmäiseen mikrofoniin (1b) ja etäisyys toiseen mikrofoniin (1c).

Mittauksesta voidaan havaita, että kaiuttimen ideaali taajuusvaste on suhteellisen tasainen noin 50 hertsistä 2500 hertsiihin. Tästä ylöspäin taajuusvasteen on syviä kuoppia (ks. kuva 2). Tämä johtuu mahdollisesti stereokaiuttimien kahden elementin luomien signaalien eriaikaisesta saapumisesta mikrofoniin, mistä seuraa kampasuodatus[1]. Kaiutin kuitenkin soveltuu hyvin tähän työhön ja valmistajan lupaus taajuusalueesta pitää paikkansa.

Ideaalisessa ympäristössä toteutetun mittauksen jälkeen impulssivaste mitattiin tavallisessa ololuoneessa. Lainasimme akustiikan laboratoriolta mittausmikrofonin ja toistimme tekemämme mittaukset. Tässä mittausasetelmassa käytettiin ainoastaan yhtä mikrofonia, joka mittaa vasteen sohvan kohdalta, jossa kuuntelijan oletetaan istuvan. Tämä mittausasetelma näkyy kuvassa 3.

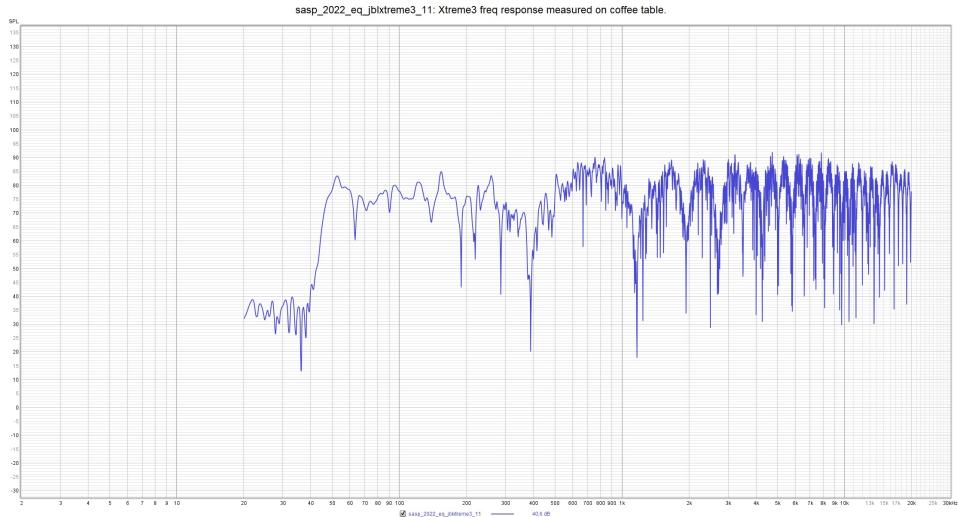


Kuva 2: Kaiuttimen taajuusvaste akustisesti ideaalissa ympäristössä.



Kuva 3: Mittausasetelma akustisesti epäideaalissa ympäristössä.

Kaiuttimen taajuusvasteesta (ks. kuva 4) voidaan havaita, että huoneen geometria ja materiaalit vaikuttavat merkittävästi taajuusvasteeseen, kun tästä verrataan kaiuttomaan huoneeseen. Kaiuttimelle täytyy siis tehdä ekvalisointi.



Kuva 4: Kaiuttimen taajuusvaste akustisesti epäideaalissa ympäristössä.

### 3.2 Ekvalisointi

Kaiuttimen vaste ekvalisoitaa Matlabilla, jonka jälkeen Python-ohjelma tekee Matlabista siirretyn CSV-tiedoston pohjalta tekstitiedoston, joka sisältää lopulliset suodatettavat taajuudet. Tämä tekstitiedosto annetaan Equalizer APO:n luettavaksi, joka hoitaa tietokoneen ulostuloon menevän äänen suodattamisen. Yksityiskohtaisemmat vaiheet ovat

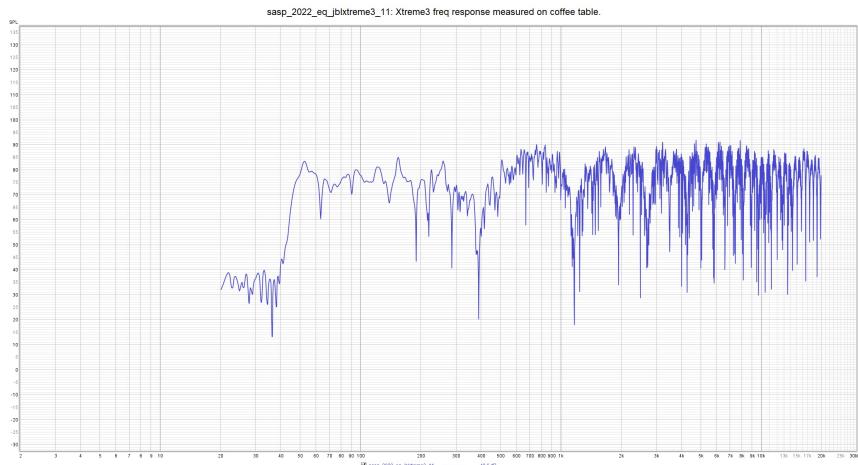
- Impulssivasteen Fast Fourier Transform/FFT laskeminen (saadaan muodostettua impulssivasteen taajuusvaste).
- (Valinnainen) Signaalin "tasoittamista" oktaavin kolmasosalla (alkuperäisessä responssissa on kohinaa, minkä vuoksi tasoittamista tarvitaan, ja kolmasosa oktaavia jälittelee ihmiskuulon tarkkuutta [3]. Kokeilimme tämän vaiheen kanssa ja ilman, ja totesimme, että näin voimakkaasti tasoitettu taajuusvaste ei ole riittävästi tarkka, joten jäitimme tasoituksen lopullisessa toteutuksessa tekemättä).
- Responssin normalisointi niin, että sen magnitudi on 0 dB 1 kHz taajuudella. (Useimmat äänitasomittarit käyttävät A-painotettua lukua kompensoimaan ihmisen kuuloherkkyyttä eri taajuuksilla. 1 kHz on A-painotuskäyrän ainoa osa, jolla ei ole painotusta [0, 0 dB]).
- Suodattimen luominen ekvalisointia varten (käytetään käänteislukusuo- datusta).
- Matlabin reaaliarvoisen taajuusvasteen vektorin tallentaminen CSV-tiedostomuodossa. Tämän voi lukea Python-ohjelmalla. Valitsimme Pytonin, koska sille on tarjolla helppoja matemaattisen laskennan ja tiedostojen käsittelyn kirjastoja. Python-kieli on myös tuttu aikaisemmista opinnoista.
- Python-ohjelmalla logaritmisesti kaiuttimen taajuusalueelle jaettujen datapisteiden lukeminen taajuusvasteesta. Datapisteitä on tiheämmän

alemmilla taajuuksilla, joissa ihmiskorva erottaa taajuuksien erot herkemmin (ihmiskorva erottaa matalammat taajuudet herkemmin, sillä hermosolujen pulssisarjat ehtivät seuraamaan ääniaaltoja [2]).

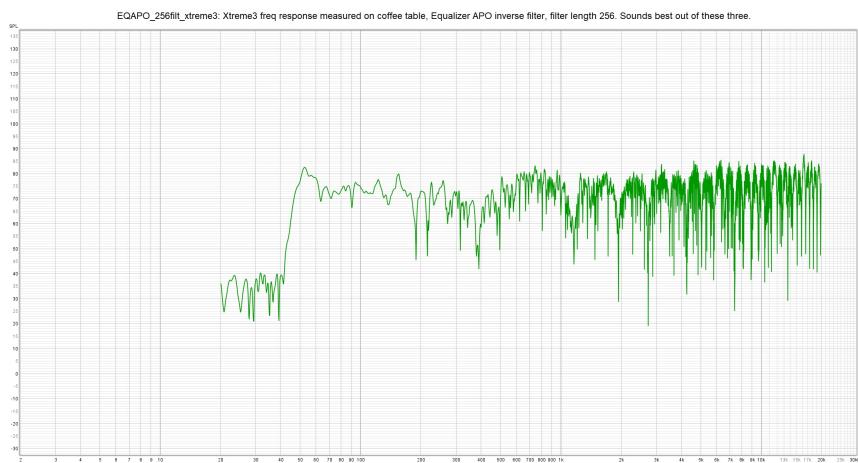
- Datapisteiden vahvistustasojen kirjoittaminen tekstitiedostoon, jonka perusteella Equalizer APO -ohjelma luo jokaiselle pisteelle oman bandpass suodattimen. Taajuuden lisäksi suodattimelle määritellään kaittanleveys Q-factor parametrissa.
- Vaimentimen lisääminen Equalizer APO -suodattimen ohelle. Tämä pitää huolen, että ekvalisoinnin kaikkien taajuusten voimakkuus pysyy alle nollan desibelin. Ilman vaimenninta ääni saattaisi leikata, joka kuuluisi ikävänä säröäänenä.

Ohjelmakoodia varten luotiin Git-repositorio, jotta projektin versionhallinta olisi mahdollisimman sujuvaa. Python-ohjelmoimisen työympäristönä käytettiin JetBrainsin IntelliJ Ultimate-ohjelmaa.

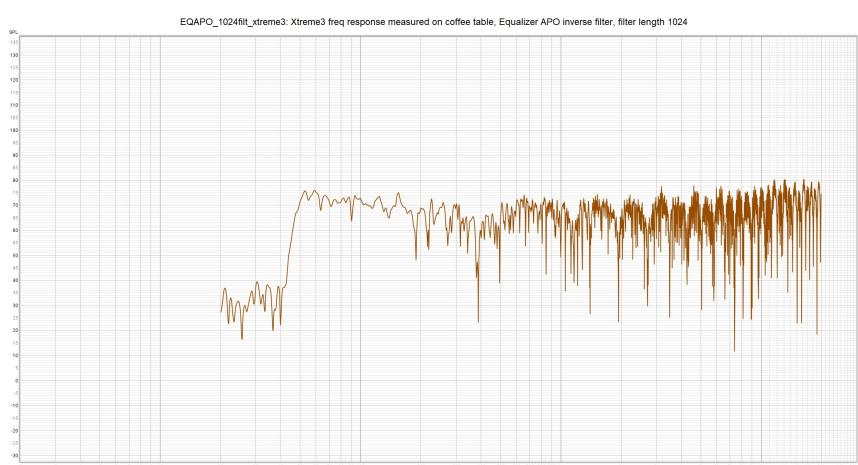
## 4 Tulokset



(a) Ekvalisoimaton vaste



(b) 256:n asteen suodatin



(c) 1024:n asteen suodattimella

Kuva 5: Ekvalisoimaton vaste (5a) sekä korjattu vaste 256:n asteen (5b) ja 1024:n asteen (5c) suodattimella.

Lopullinen ekvalisoitu kaiutin mitattiin vielä uudestaan Room EQ Wizard-ohjelmistolla. Kuvissa 5 näkyy alkuperäinen vaste sekä ekvalisaatio kahdella

eri suodattimen asteluvulla. Kuvista voi huomata, että 256-asteinen ekvalisaatio tasottaa kohtalaisesti taajuusspektriä. 1024-asteinen ekvalisaatio taas tasottaa sitä merkittävästi.

Ekvalisaation kuulee myös korvalla. Alkuperäisessä vasteessa jotkin basso-, keski- ja diskanttitason taajuudet ovat vaimeampia. Ekvalisaatio selkeyttää huomattavasti musiikkia. Kuitenkin 1024-asteen ekvalisoinnilla musiikki alkoi kuulostamaan erikoiselta, ehkä hieman putkimaiselta.

## 5 Johtopäätökset

Saimme ekvalisaation toimimaan. Korvakuulolla arvioituna kaiuttimen basso-toisto kuulostaakin tasaisemmalta ja paremmalta. Korkeiden äänien kohdalla taajuusvasteen tasaus ei kuitenkaan toimi yhtä hyvin: korkeat äänet (noin 7 kHz ja siitä ylöspäin) voimistuvat (jälleen korvakuulolla arvioituna) liikaa, ja kuulostavat epämiellyttäviltä. Tämä on kuitenkin odotettua, koska mittaa-massamme taajuusvasteessa korkeat taajuudet ovat hiljaisempia kuin 1 kHz referenssikohtamme.

Työtä olisi voinut parantaa kirjoittamalla ekvalisointiprosessin täysin yhdellä kielellä, kuten pelkällä Matlabilla tai Pythonilla. Muut ryhmät ilmeisesti käyttivät Matlabin Audio Toolboxia, mikä olisi ollut hyvä vaihtoehto. Lisä-haastetta saisi jos toteuttaisi suodatuksen C++ -kielellä. Tämä olisi mahdol-listanut tehokkaan reaalialkaisen suodatuksen ilman kolmannen osapuolen ohjelmaa (Equalizer APO/Matlab).

Projektissa haastavinta oli ehkä spektrin käsittelyminen Matlabissa. Projek-tia tehdessä akustiikan mittaustaidot ja ymmärrys suodattimista kehittyivät huimasti.

## Viitteet

- [1] Acoustical Society Of America. Perceptual equalization of artifacts of sound reproduction via multiple loudspeakers, 2013. Accessed: 2022-12-13.
- [2] HUS Biomag Laboratory. Aivojen rakenne ja toiminta: Kuulo, 2016. Accessed: 2022-12-11.
- [3] Vesa Välimäki and Joshua D. Reiss. All about audio equalization: Solutions and frontiers. *Applied Sciences*, 6(5), 2016.