

# **DIGITAALINEN ÄÄNISIGNAALI JA DA-MUUNNIN**

Juha Maunula

Opinnäytetyö  
Toukokuu 2011  
Tietotekniikan koulutusohjelma  
Sulautetut järjestelmät ja elektroniikka  
Tampereen ammattikorkeakoulu

**TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU**  
Tampere University of Applied Sciences

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tietotekniikan koulutusohjelma  
Sulautetut järjestelmät ja elektroniikka

MAUNULA, JUHA: Digitaalinen äänisignaali ja DA-muunnin

Opinnäytetyö 58 s., liitteet 6 s.  
Toukokuu 2011

---

Tässä työssä tutkittiin digitaalisen äänisignaalin ominaisuuksia ja teoriaa sekä sovellettiin sitä käytäntöön suunnittelemalla laite, joka muuntaa digitaalisen äänisignaalin analogiseksi sähköiseksi signaaliksi.

Työssä tutustuttiin digitaalisen äänen ominaisuuksiin ja siihen, miten se rakentuu analogisesta äänisignaalista. Lisäksi perehdyttiin S/PDIF-, USB- ja I<sup>2</sup>S-väyliin, jotka ovat yleisimpiä väylätyyppejä digitaalisen äänisignaalin siirrossa. Tässä työssä tutkittiin myös näiden väylien käyttämiä protokollia sekä äänenlaatuun vaikuttavia tekijöitä. Laitteen suunnittelun ja toteutuksen päätarkoituksena oli elektroniikkasuunnitteluun tutustuminen sekä digitaalisen äänen teorian esittäminen käytännön sovelluksessa.

Laitteeseen suunniteltiin kytkentäkaaviot sekä piirilevyt teholähteelle ja DA-muunninlaitteelle. DA-muunninlaite sisältää vastaanotinmoduulin, S/PDIF-signaalin dekooderin, varsinaisen DA-muuntimen sekä analogisen esivahvistinasteen. Suunnittelun jälkeen valmistettiin piirilevyt ja koottiin laite. Kun laite oli koottu ja testattu toimivaksi, mitattiin siitä suorituskykyarvot.

## ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Computer Science  
Option of Embedded Systems and Electronics

MAUNULA, JUHA: Digital Audio Signal and DA-Converter

Bachelor's thesis 58 pages, appendices 6 pages.  
May 2011

---

The purpose of this thesis was to study characteristics and theory of digital audio signal and apply it to practice by designing a device that converts digital audio signal to analog sound.

Properties of digital audio signal and the elements that form the signal over different protocols were studied. In addition, S/PDIF, USB and I<sup>2</sup>S interfaces were studied as they are the most commonly used digital audio interfaces. The effects of different interfaces on sound quality were also examined. By designing and implementing the device, the main purpose was to study electrical design and present the digital sound theory in a practical design.

There were wiring diagrams and printed circuit boards designed for power supply and DA-converter device. DA-converter device consisted of receiver module, S/PDIF signal decoder, DA-converter and an analog preamplifier stage. When the design was ready, printed circuit boards were manufactured and device was assembled. After assembly, device was tested and performance figures were measured.

---

Key words: Digital audio, DAC, DA-converter, PCM

## SISÄLLYS

1 JOHDANTO .....	6
2 DIGITAALINEN ÄÄNI .....	7
2.1 Pulssikoodimodulaatio .....	7
2.2 Jitter .....	12
2.3 S/PDIF-väylä .....	13
2.3.1 Fyysinen siirtotie .....	13
2.3.2 Protokolla .....	13
2.4 USB-väylä .....	16
2.4.1 Fyysinen siirtotie .....	18
2.4.2 USB-laite .....	19
2.4.3 Toistin .....	20
2.4.4 Funktio .....	21
2.4.5 Päätepiste .....	21
2.4.6 Laitteen liittäminen .....	22
2.4.7 Tiedonsiirtotyypit .....	23
2.4.8 Protokolla .....	24
2.5 I <sup>2</sup> S-väylä .....	28
3 LAITE .....	30
3.1 Teholähde .....	32
3.2 Vastaanotinmoduuli .....	35
3.2.1 Optinen sisääntulo .....	35
3.2.2 USB sisääntulo .....	35
3.3 S/PDIF-dekooderi .....	40
3.4 DA-muunnin .....	44
3.5 Vahvistin .....	48
3.6 Piirilevyjen valmistus .....	49
4 MITTAUSTULOKSET .....	52
4.1 Harmoninen särö ja kohina .....	52
4.2 Taajuusvaste .....	53
4.3 Ylikuuluminen .....	55
5 YHTEENVETO .....	56
LÄHTEET .....	57
LIITTEET .....	59

## LYHENTEET

DAC	Digital to Analog Converter, muunnin joka muuttaa digitaalisen signaalin analogiseksi
S/PDIF	Sony / Philips Digital Interface Format, Sonyn ja Philipsin kehittämä digitaalisen äänen protokolla
PCM	Pulse Code Modulation, pulssikoodimodulaatio
PLL	Phase Locked Loop, vaihelukittu silmukka
I <sup>2</sup> S	Integrated Interchip Sound, sarjamuotoinen väylästandardi digitaaliselle äänelle
USB	Universal Serial Bus, sarjamuotoinen liitäntä lisälaitteiden kytkemiseksi tietokoneeseen
BMC	Biphase Mark Code, S/PDIF protokollan signaalin moduloititapa

## 1 JOHDANTO

Digitaalisella äänellä tarkoitetaan analogisen sähköisen äänisignaalin digitaalista esitysmuotoa. Analoginen sähköinen signaali voidaan muuntaa digitaalseksi pulssikoodimodulaatiota (PCM) käyttäen. Tässä menetelmässä analogisesta signaalista otetaan näytteitä tasaisella näytteenottotaajuudella ja kunkin näytteen amplitudi muutetaan sitä vastaavaksi numeroarvoksi.

Yleisimmät digitaalisen äänen siirtoprotokollat on suunniteltu siirtämään PCM-koodattua ääntä. Tässä työssä tutustutaan kuluttajalaitteissa standardiksi muodostuneeseen S/PDIF-protokollaan, USB-protokollaan sekä yleensä laitteiden sisällä äänen kuljettamiseen tarkoitettuun I<sup>2</sup>S-protokollaan. Reaaliaikaisessa tiedonsiirrossa äänisignaalia huonontava tekijä on jitter, jolla tarkoitetaan digitaalisen signaalin aikatasoista huojuntaa.

Laite tarvitsee neljä eri jännitettä joka toteutetaan teholahteessa neljällä eri regulaattorilla. Teholahteessa muuntajana toimii rengassydänmuuntaja, jonka antama jännite kokoalittotasasuunnataan ja suodatetaan suotokondensaattoreilla. Vastaanotinmoduuliin tulee kaksi sisääntuloa, S/PDIF-signaali optisella TOSLINK-liitynnällä sekä USB. USB-vastaanottimena käytettiin Texas Instrumentsin PCM2704-piiriä, joka muuttaa digitaalisen äänen USB-väylältä S/PDIF-signaaliksi.

Texas Instrumentsin S/PDIF-dekooderi DIR9001 dekodaa sarjamuotoisen S/PDIF-signaalin I<sup>2</sup>S-väylälle, joka syötetään Texas Instrumentsin PCM1793 DA-muunninpiirille. DA-muuntimelta saatava differentiaalinen analoginen äänisignaali syötetään balansoituun vahvistinasteeseen, joka muuttaa sen epäsymmetriseksi yksijohtimiseksi signaaliksi, jonka referenssitaso on laitteen maataso. Vahvistinaste vahvistaa signaalin 1,8-kertaiseksi ja sisältää alipäästösuodattimen, jonka rajataajuus on 68 kHz.

## 2 DIGITAALINEN ÄÄNI

Äänen digitalisoiminen tuo monia etuja analogiseen äänisignaaliin verrattuna. Digitaalinen äänisignaali on teoriassa häviötön, eli sen laatu ei heikkene kopioitaessa tai siirrettäessä ääntä laitteesta tai tallennusmediasta toiselle. Siinä missä analogista ääntä tallennetaan mekaanisesti (vinyylilevy) tai magneettisesti (nauha), voidaan digitaalista ääntä tallentaa huomattavasti monimuotoisemmin. Yleisesti käytettyjä digitaalisen äänen tallennusmenetelmiä ovat magneettinen (tietokoneen kiintolevy, nauha), sähköinen (flash-muisti) tai optinen (cd-levy). Nykyaikaisilla tallennusmenetelmillä tallennustiheys eli median fyysinen koko on vain murto-osia vanhoihin analogisiin tallennusmenetelmiin verrattuna. Digitaalista signaalia on myös helpompi muokata.

Analoginen signaali on alttiimpi häiriöille kuten kohinalle ja särölle sekä erilaisille vaihevirheille. Häiriön määrä signaalissa riippuu käytettävien laitteiden laadusta ja niiden tavasta käsitellä signaalia. Koska digitaalinen ääni koostuu biteistä, se ei ole samalla tavalla altis häiriöille, ja nykyiset tiedonsiirtoprotokollat takaavat virhekorjauksella datan siirtymisen muuttumattomana. Reaaliaikaisessa digitaalisen äänen siirrossa esiintyy ainoana äänenlaatua heikentävänä ilmiönä jitter. Sen suora vaikutus äänenlaatuun on melko pieni ja suuruus riippuu käytettävien laitteiden laadusta.

Edellä mainituista syistä johtuen suurin osa nykypäivänä nauhoitetusta äänisignaalista, esimerkiksi musiikki sekä tv-ohjelmien ja elokuvien ääniraidat, muutetaan mahdollisimman aikaisessa vaiheessa tuotantoketjua digitaaliseksi.

### 2.1 Pulssikoodimodulaatio

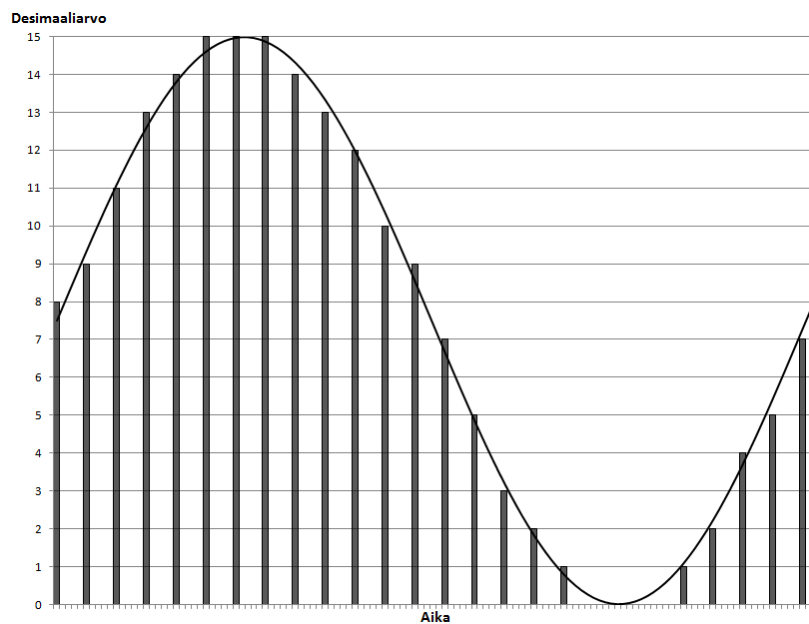
Pulssikoodimodulaatio, eli PCM on menetelmä, joka on kehitetty analogisen sähköisen äänisignaalin esittämiseksi digitaalisessa muodossa. Pulssikoodimodulaatio on standardi ääniformaatti ja sitä käytetään mm. Blu-Ray-elokuvien ääniraidoissa sekä CD-äänilevyissä.

Pulssikoodimodulaatiossa analogisesta signaalista otetaan näytteitä tasaisin väliajoin ja näytteen amplitudiarvo sovitetaan sitä vastaavaksi kokonaislukuarvoksi sekä edelleen siitä binääriluvuksi. Numeroasteikko riippuu siitä, kuinka monella bitillä näyte esite-

tään. Tätä menetelmää kutsutaan kvantisoinniksi. Mitä useammalla bitillä näyte esitetään, sitä enemmän on käytössä kokonaislukuarvoja, jolloin kvantisointiväli pienenee ja analogisen signaalin amplitudiarvo saadaan esitettyä tarkemmin.

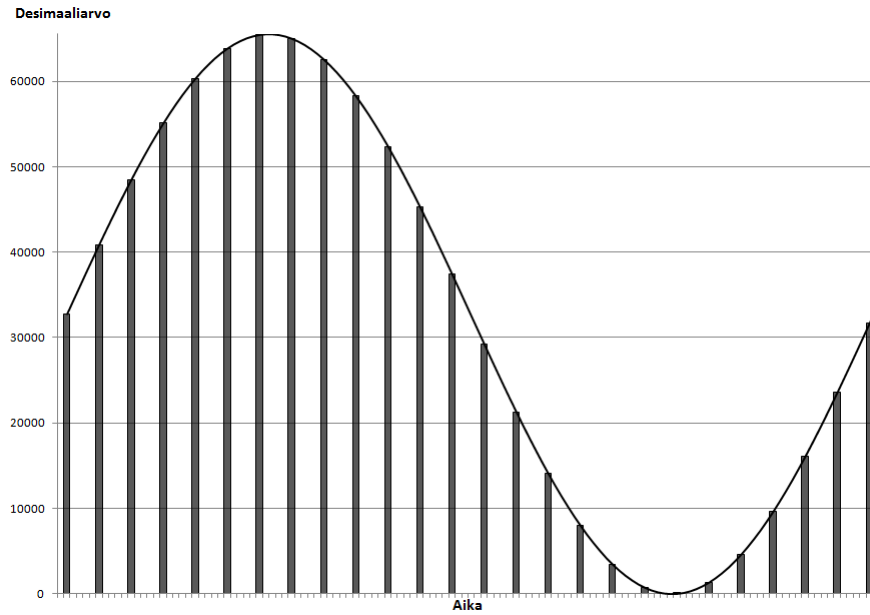
Mikäli näytteen bittimäärä on pieni, kvantisointiväli jää suureksi eikä kvantisoitu näyte vastaa kovin hyvin analogista amplitudiarvoa. Tätä eroa signaalin oikean amplitudin ja kvantisoidun amplitudin välillä kutsutaan kvantisointivirheeksi. Kvantisointivirhe vääristää äänisignaalia ja aiheuttaa siihen kvantisointikohinaa ja kvantisointisäröä. [6]

Kuvassa 1 on esitetty sinisignaali vakionäytteenottotaajuudella ja 4 bitin tarkkuudella. 4 bitin tarkkuudella mahdollisia kvantisointitasoja on  $2^4 = 16$ , eli desimaalilukuarvot 0 – 15. Kuten kuvasta nähdään, kvantisoidut näytteet eivät vastaa alkuperäistä sinisignaalia kovinkaan tarkasti.



Kuva 1. Nelibittisesti kvantisoitu sinisignaali

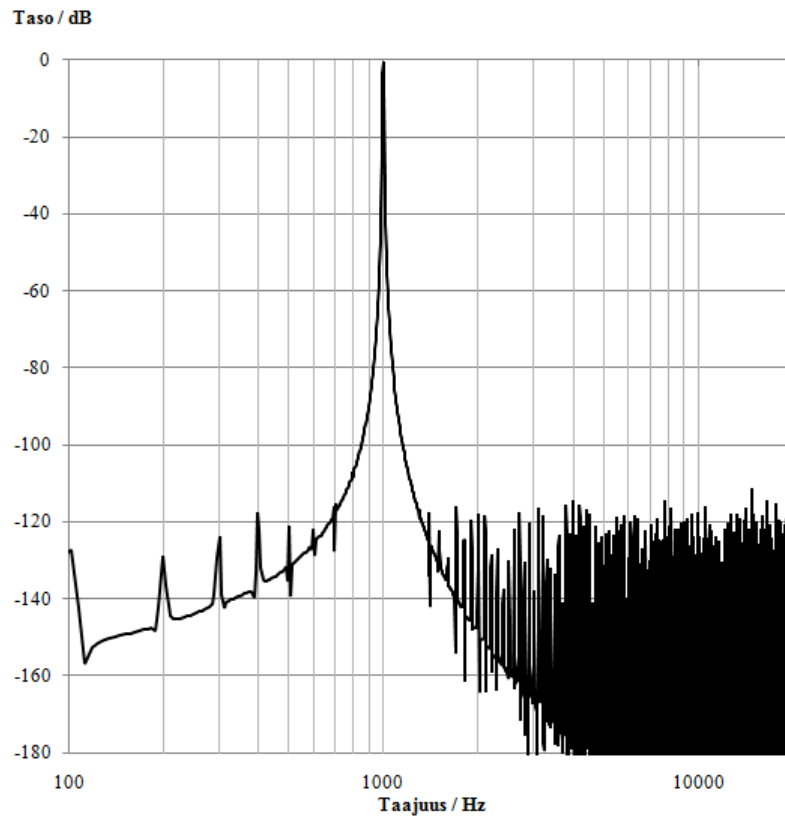
Vertailun vuoksi kuvassa 2 on esitettyä sama sinisignaali 16 bitin tarkkuudella. 16 bitin tarkkuudella kvantisointitasoja on  $2^{16} = 65\,536$ , joten kvantisoidut näytteet vastaavat alkuperäistä sinisignaalia huomattavasti paremmin.



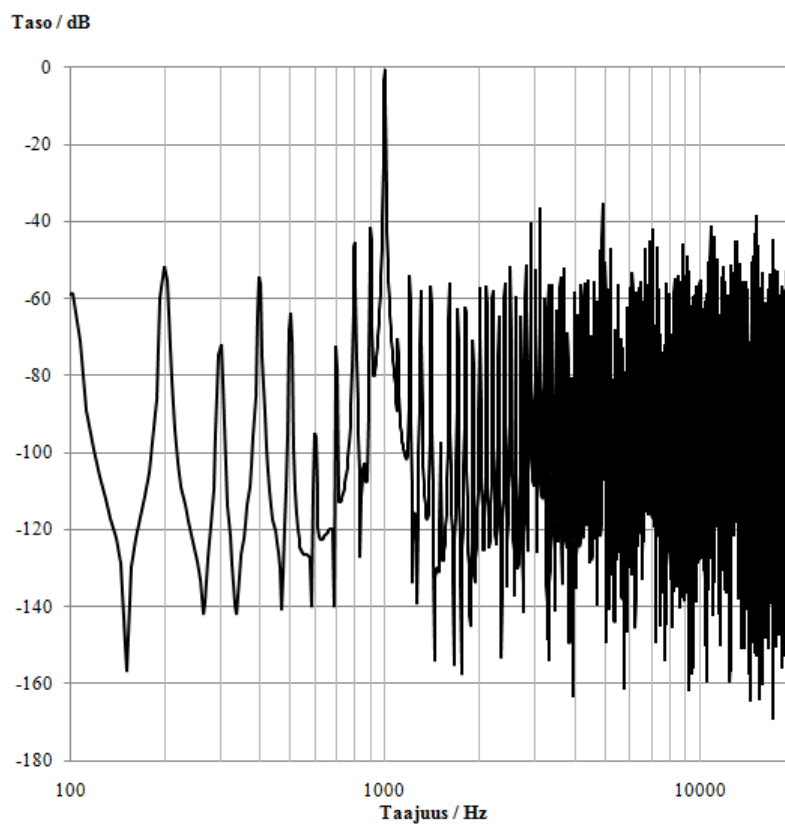
Kuva 2. 16 bitillä kvantisoitu sinisignaali

Varsinkin jaksollisessa signaalissa, kuten esimerkkinä käytetyssä sinisignaalissa kvantisointivirhekin on jaksollista ja muodostaa signaaliin satunnaisen kohinan sijasta harmonista säröä. Edelleen, mitä suurempi bittitarkkuus, sitä pienempi on harmonisen särön määrä. [15]

Kuvissa 3 ja 4 on esitettyä FFT-spektrikuvaajat PC:llä generoidusta 16 bittisestä ja 4 bittisestä 1 kHz:n sinisignaalista 44,1 kHz:n näytteenottotaajuudella.



Kuva 3. FFT-spektri 1 kHz sinisignaalista 16 bitin tarkkuudella.

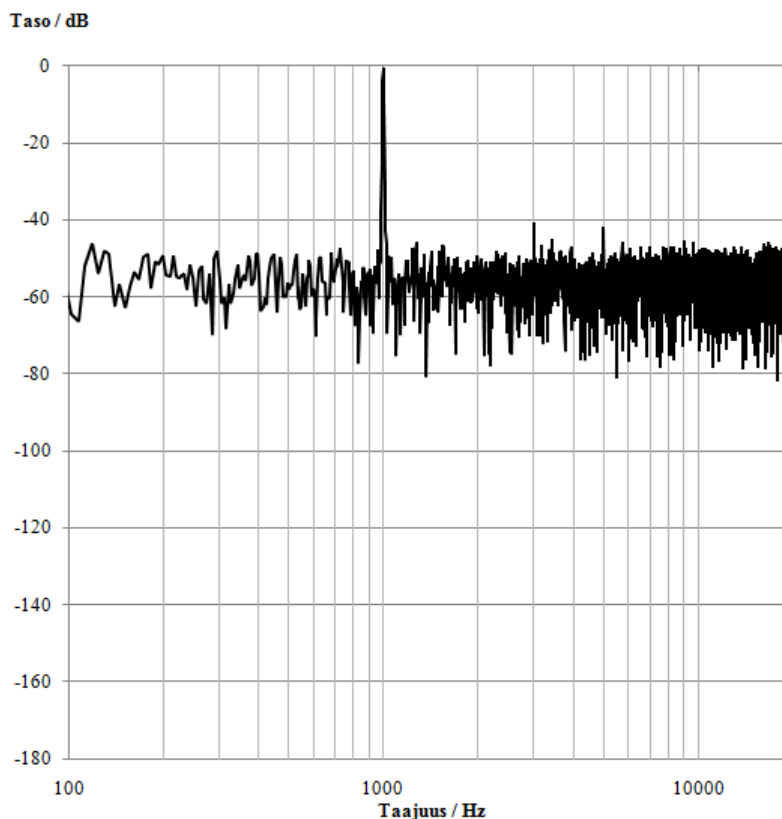


Kuva 4. FFT-spektri 1 kHz sinisignaalista 4 bitin tarkkuudella.

Kuvissa 3 ja 4 huomataan jaksollisen kvantisointivirheen aiheuttaman harmonisen särön komponentit 100 Hz:n välein. 16 bitin resoluutiolla särökomponentit ovat huomattavasti pienempiä.

Kvantisointisäröä saadaan minimoitua menetelmällä nimeltään dither. Ennen kvantisointia signaaliin lisätään kohinaa, joka on voimakkuudeltaan alle yhden kvantisointitason. Tällöin signaali voi vaihdella satunnaisesti kahdella eri kvantisointitasolla eikä tällöin jaksollisuutta kvantisointivirheessä pääse esiintymään. Vaikka tämä menetelmä tuottaa signaaliin hieman kohinaa, on harmoniset komponentit tärkeä eliminoida kvantisointivaiheessa, koska ihmiskorva on herkempi pistetaajuuksille kuin koko kuulospektrin levyiselle kohinalle. [15]

Kuvassa 5 on esitetty sama 1 kHz:n sinisignaali 4 bitin tarkkuudella mutta tällä kertaa ditheröitynä.



Kuva 5. FFT-spektri ditheröitystä 1 kHz sinisignaalista 4 bitin tarkkuudella.

4 bitin tarkkuudella esitettyä signaalia ei juurikaan käytetä käytännön sovelluksissa, vaan se on tässä ainoastaan havainnollistavana esimerkkinä. Käytännön sovelluksissa käytetään yleensä vähintään 16 bitin tarkkuutta 44,1 kHz:n näytteenottotaajuudella. [15]

Nyquistin teoreeman mukaan näytteenottotaajuuden tulee olla vähintään kaksinkertainen suurimpaan hyötysignaalin taajuuteen verrattuna, jotta signaali ei laskostu. Ihmiskorvan kuuloalue on tyypillisesti 20 Hz – 20 kHz jolloin yleisesti käytetty 44,1 kHz:n taajuus on hieman yli kaksinkertainen hyötysignaaliin nähden.

## 2.2 Jitter

Jitter käsitteenä on melko laaja, mutta pääsääntöisesti sillä tarkoitetaan aikatasossa tapahtuvaa virhettä digitaalisessa tiedonsiirrossa. Virhe johtuu vaihtelevista viiveistä digitaalisessa signaaliketjussa. Syitä tälle voi olla esimerkiksi virtalähteen huono suunnittelu, epätarkka kello lähetys- ja vastaanottopäässä tai piirien sekä johtimien heijastukset. Esimerkkinä äärimmäisen pahasta jitteristä voidaan pitää tilannetta jossa lähetyspäästä lähtenyt kanttiaalto on vastaanottopäässä reunoiltaan pyöristynyt ja ajallisesti niin vääristynyt että bitit tulkitaan väärin. [4]

Vaikka tilanne ei ole käytännössä näin paha ja bitit tulkitaan vastaanottopäässä oikein, signaalin aikatasoinen huojunta on silti ongelma. Kun signaali välitetään laitteiden välillä sarjamuotoisena eikä se sisällä erillistä kellosignaalia, DA-muuntimet johtavat yleensä kellotaajuutensa sisään tulevasta enkoodatusta datasta. Mikäli signaalissa esiintyy aikatasoista huojuntaa, ei DA-muuntimen kellokaan ole stabiili. Epästabiili kello aiheuttaa sen että DA-muunnoksen yhteydessä analogiseen äänisignaaliin saattaa tulla kohinaa, säröä tai kokonaan vääriä taajuuksia. [7]

### 2.3 S/PDIF-väylä

Digitaalisen äänen yleistyminen CD-levyn myötä 80-luvun puolessavälissä toi tarpeen luoda standardoitu digitaalinen siirtoprotokolla eri laitteiden välille. Vuonna 1985 AES (Audio Engineerin Society) ja EBU (European Broadcasting Union) julkaisivat ensimmäisen version AES/EBU standardista. Standardi määritteli 16 – 24 bitin resoluutiolla ja joko 44,1 kHz:n (CD-levy) tai 48 kHz:n (DAT-nauha) näytteenottotaajuudella PCM-koodatun digitaalisen äänisignaalin kuljettamisen. Fyysinen siirtotie oli kolme johdinta sisältävä balansoitu 110 ohmin kaapeli jossa oli XLR-liittimet. [2]

#### 2.3.1 Fyysinen siirtotie

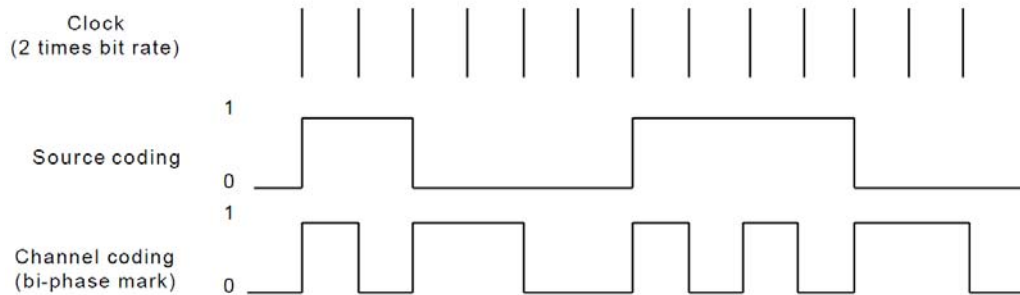
Sony ja Philips kehittivät paremmin kuluttajaelektroniikkaan soveltuvan S/PDIF (IEC985) standardin, joka pohjautui AES/EBU standardiin. Siinä fyysinen siirtotie oli korvattu 75 ohmin koaksiaalikaapelilla jossa oli RCA-liittimet. Tämä siitä syystä että kyseinen kaapeli oli halpaa ja sitä käytettiin enemmän videon siirrossa jolloin nämä videokaapelit soveltuivat suoraan käytettäväksi myös S/PDIF signaaliin siirtoon. Standardi määritteli toiseksi siirtotieksi optisen valokuidun jossa oli Toshiba valmistamat F05-liittimet. Kuidussa kulkevan valon aallonpituus on 650 nm, joten ihmissilmä näkee sen punaisena. Nykyään liityntä tunnetaan paremmin nimellä TOSLINK. Optisen liityntän etuna on galvaaninen erotus laitteiden välillä. Tällöin laitteiden välille ei pääse muodostumaan maalenkkiä ja korkeataajuiset häiriöt eivät välity laitteesta toiseen. [12]

S/PDIF protokolla on muilta osin lähes identtinen AES/EBU protokollan kanssa. Ainoana eroavaisuutena S/PDIF:n ja AES/EBU:n välillä on kanavatilana(channel status) bittien merkitys. [2]

#### 2.3.2 Protokolla

AES/EBU standardi kehitettiin tukemaan PCM-koodattua ääntä pääosin 48 kHz:n tai 44,1 kHz:n näytteenottotaajuudella, mutta näytteenottotaajuus ei kuitenkaan rajoitu näihin kahteen. Data on yksisuuntaista sarjamuotoista BMC-koodattua (Biphase Mark Code) signaalia. BMC-koodauksessa, joka on esitetty kuvassa 6, kellotaajuus on kaksinkertainen datan kellotaajuuteen ja jokainen databitti esitetään kahdella bitillä. Jokaisen databitin kohdalla BMC-koodattu bitti vaihtaa tilaansa, ja mikäli databitti on 1, toinen

koodattu bitti vaihtaa myös tilaansa. Mikäli databitti on 0, toinen koodattu bitti on sama kuin edellinen. [2]



Kuva 6. Biphase Mark Code [2]

BMC-koodauksella vältytään synkronointiongelmilta koska signaali vaihtaa tilaansa joka databitin kohdalla. Protokolla ei määrittele ennalta käytettäviä näytteenottotaajuuksia, vaan vastaanotin tunnistaa äänisignaalin näytteenottotaajuuden BMC-koodatusta datasiignaalista, jonka taajuus on 128-kertainen näytteenottotaajuuteen nähden.

Jokaista näytteenottotaajuuden ajanhetkeä varten varataan 64 bittinen kehys. Kehys sisältää kaksi 32 bittistä alikehystä. Alikehykset sisältävät vasemman ja oikean kanavan ääninäytteen, synkronointibittejä, kanavavälit- ja käyttäjäbittejä sekä virheentarkistukseen käytetyn pariteettibitin. Yksi lohko sisältää 192 kehystä.

Yhden näytteen koko voi olla 20 tai 24 bittiä. Mikäli näytteen koko on 20 bittiä, jää bitit 4 - 7 vapaavalintaiseen käyttöön. Mikäli saatu näyte on pienempi kuin alikehykseen näytteen määriteltä koko, asetetaan vähiten merkitsevistä bitistä lähtien bittejä nolllaksi. Esimerkiksi CD-levyn ääni on 16 bittistä, jolloin bitit 8 – 11 asetetaan nolllaksi. [2]

0	3	4	7	8	27	28	29	30	31	
Preamble	Auxiliary sample bits		LSB	20-bit audio sample word		MSB	Validity bit	User data bit	Channel status bit	Parity bit

Kuva 7. Alikehys 20 bittisellä näytteellä. [2]

0	3	4		27	28	29	30	31
Preamble	LSB		24-bit audio sample word	MSB	Validity bit	User data bit	Channel status bit	Parity bit

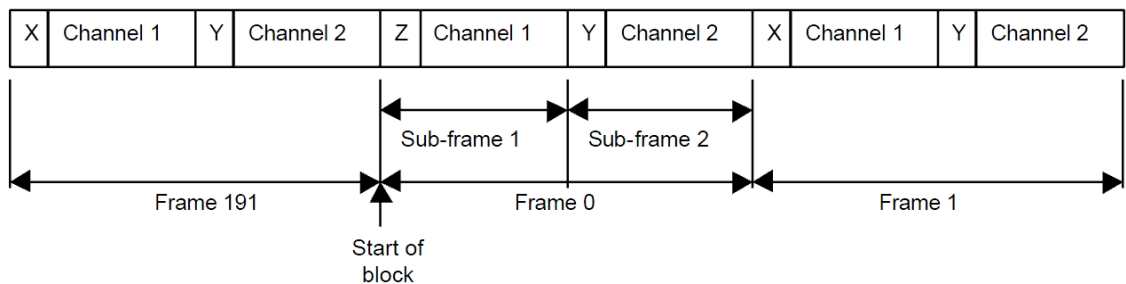
Kuva 8. Alikehys 24 bittisellä näytteellä. [2]

Kuvassa 7 ja 8 on esitetty yhden 20 ja 24 bittisen alikehysten rakenne. Alikehys alkaa 4 bittisellä alustuksella. Alustuksen tarkoitus on synkronoida ja määrittää kehyksen sijainti lohkoissa. Jotta taataan varmatoiminen synkronointi yhden näytteen aikana, alustusta ei BCM-koodata ja alustus rikkoo tarkoituksella BCM-koodin muodon. Tämä siitä syystä ettei alustus sekoitu dataan. Alustuksia on kolme erilaista ja niistä on kaksi variaatiota, jotka riippuvat datasihtaalien edellisestä tilasta. Alustukset on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Alikehysten alustukset [2]

Edellinen tila	0	1	
X	11100010	00011101	Alikehys 1
Y	11100100	00011011	Alikehys 2
Z	11101000	00010111	Alikehys 1 sekä lohkon alku

Alustus ”X” tarkoittaa, että kyseessä on alikehys 1, eli vasen kanava. ”Y” tarkoittaa, että kyseessä on alikehys 2 eli oikea kanava. Alustus ”Z” tarkoittaa uuden lohkon alkua ja alikehystä 1. Kuvassa 9 on esitetty lohkon alku ja alikehysten alustukset.



Kuva 9. Alikehysten alustus ja lohkon aloitus. [2]

Alustuksen jälkeen tulee 20-bittisellä näytteen koolla neljä ylimääräistä bittiä 4 – 7, jotka standardi määrittelee vapaasti käytettäväksi. Bitit 8 – 27 sisältävät varsinaisen ääninäytteen. Mikäli käytetään 24-bittistä näytteen kokoa, koko bittiväli 4 – 27 on varattu ääninäytteen. [2]

Varsinaisen näytteen jälkeen tulee validiteettibitti 28, jossa arvo 0 tarkoittaa näytteen olevan validi ja se voidaan muuntaa analogiseksi ääneksi, 1 tarkoittaa, että näyte ei ole validi eikä sitä muunneta analogiseksi. Tällaisia tilanteita jossa data ei ole validi muunnettavaksi, on esimerkiksi sovellukset jossa siirretään MPEG2, AC3, DTS -enkoodattua ääntä lineaarisen PCM:n sijasta. Tällaiset formaatit ovat pakattuja ja voivat sisältää useita äänikanavia jota käytetään siirtämään esimerkiksi kotiteattereissa käytettävää 5.1 monikanavaääntä. Näissä tapauksissa S/PDIF:n yli siirretty data syötetään vastaanottopäässä olevalle dekooderille, joka purkaa datan ja vasta sitten DA-muuntaa kanavat erikseen. [12]

Bitti 29 on varattu käyttäjän omalle datalle. Bitti 30 on kanavatilabitti. Koska S/PDIF on kuluttajakäyttöön tehty protokolla, eroaa kanavatilabitit ammattikäyttöön tehdyn AES/EBU-standardin kanssa. Kanavatila sisältää tietoa kyseisestä äänisignaalista kuten näytteenottotaajuudesta ja näytteen koosta sekä kopiosuojauksesta. Kanavatila koostuu 12:stä 16-bittisestä tavusta, eli yhteensä 192 bitistä, jotka välitetään bitti kerrallaan per alikehys vastaanottimeen. Kanavatilän lähetys kestää koko lohkon ajan, eli 192 alikehystä. Bitti 31 on pariteettibitti jota käytetään virheentarkistuksessa. [2]

## 2.4 USB-väylä

USB (Universal Serial Bus) on vuonna 95 esitelty sarjamoitoinen väylä, joka kehitettiin alun perin lisälaitteiden kytkemiseksi tietokoneeseen. Aiemmin vallinneisiin lisälaitteportteihin verrattuna (sarja/rinnakkaisportti) USB-väylä tarjoaa +5V tasajännitteen, jolloin monet lisälaitteet eivät tarvitse ulkoista virtalähdettä. USB:n on kehittänyt USB-IF (USB Implementation Forum) jonka ovat perustaneet isot teknologiajätit Compaq, Hewlett-Packard, Intel, Lucent, Microsoft, NEC ja Philips. [14]

Motivaationa uuden liityntämuodon kehittämiseksi oli kolme asiaa:

- **Puhelimen yhdistäminen tietokoneeseen.** Ymmärrettiin, että tietotekniikan ja telekommunikaation yhtyminen tulee olemaan pohja tulevaisuuden sovelluksille ja tietotekniikan kehittymiselle. Ennen tietotekniikkaa ja telekommunikaatiota oli kehitetty pääasiassa erillisinä haaroina. USB tarjoaa linkin näiden kahden välille.
- **Käytön helppous.** Haluttiin tehdä lisälaitteiden lisäämisestä ja nykyisen PC-järjestelmän muokkaamisesta helpommin lähestyttävää ja yksinkertaisempaa.

Silloin olemassa olevat väylät(sarja/rinnakkaisportit) olivat normaalikäyttäjälle hankalia konfiguroida eikä niihin yleensä saanut kuin yhden laitteen kiinni kerrallaan. Vanhat väylätekniikat eivät myöskään tukeneet Plug-and-Play-toimintoa.

- **Porttien laajennettavuus.** Lisälaitteiden määrä rajoittui vapaana olevien porttien lukumäärään. USB toi kaksisuuntaisen ja halvan liityntätavan jossa lisälaitteiden määrä ei suoraan rajoittunut PC:ltä löytyvien porttien lukumäärään.

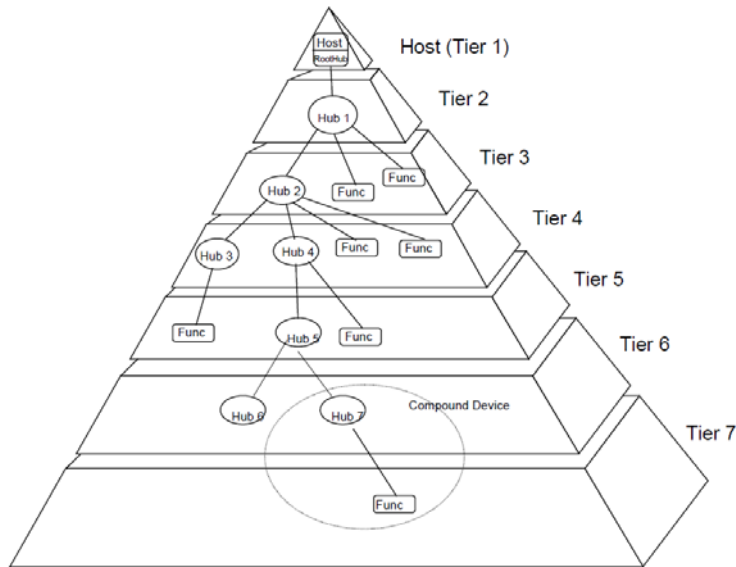
USB 1.0 julkaistiin vuonna 1996 ja se salli 1,5 Mbit/s siirtonopeuden. Ensimmäinen laajemmin käyttöön levinnyt versio USB:stä oli versio 1.1, joka julkaistiin vuonna 1998. Tässä versiossa oli kaksi eri siirtonopeutta, suurempi 12 Mbit/s esimerkiksi massamuistilaitteille sekä pienempi 1,5 Mbit/s näppäimistöille ja muille laitteille, jotka eivät vaadi suurta siirtonopeutta. USB 2.0 julkaistiin vuonna 2000. Suurimpana muutoksena USB 1.1:n verrattuna 2.0 tarjoaa kolmannen 480 Mbit/s siirtonopeuden. USB 2.0 on taaksepäin yhteensopiva edellisten versioiden kanssa ja on tänä päivänä käytetyin USB versio. Vuosien varrella USB 2.0 spesifikaatioon on tehty useita muutoksia ja lisäyksiä, kuten mini- ja micro-liittimet, langaton USB(WUSB), USB OTG sekä spesifikaatiot akun lataukseen USB:n kautta.

USB 3.0 julkaistiin vuonna 2008 ja se lisää neljännen 4,8 Gbit/s siirtonopeuden. Maksimi virrananto portista on kasvanut 900 mA:iin USB 2.0:n 500 mA:n sijaan. Ensimmäiset kuluttajille suunnatut USB 3.0 laitteet on julkaistu vasta vuonna 2010 joten USB 3.0 ei ole vielä kovin laajalle käyttöön levinnyt versio.

USB-järjestelmä koostuu kolmesta pääkomponentista.

- **Isäntä** USB järjestelmässä on vain yksi isäntä ja se toimii kontrollerina koko järjestelmälle. Kontrollerin tehtäviin kuuluu laitteiden lisäämisen ja irrottamisen tunnistus, kontrolli- ja datavirran hallinta laitteiden ja isännän välillä, virransyöttö laitteille sekä osoitteiden jako laitteille. Yhteen kontrolleriin voidaan kytkeä 127 laitetta.
- **Toistin** Toistin muuttaa yhden liityntäpisteen useaksi liityntäpisteeksi. Näitä liityntäpisteitä kutsutaan porteiksi johon voidaan kytkeä toisia toistimia tai laitteita.

- **Funktio** Funktiolla tarkoitetaan USB-laitetta, joka tarjoaa jonkin toiminnallisuuden ja se liitetään USB-kaapelilla toistimen porttiin. Usein funktio ja toistin ovat samassa paketissa, jolloin tällaista yhdistelmää kutsutaan yhdistelmälaitteeksi.

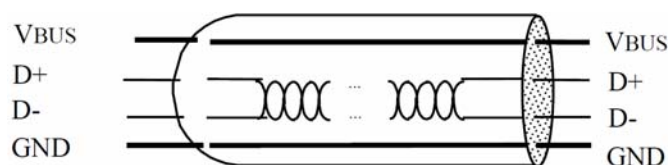


Kuva 10. USB-järjestelmän topologia [14]

Kuten kuvasta 10 nähdään, topologia on jaettu tasoihin, jossa isäntä on tasolla 1 ja jokaiseen toistimeen kytketään muita laitteita tähtikytkennän tyyppisesti. Kaapelin nousuajasta ja toistimen viiveestä johtuvien ajoitusrajoitusten takia tasojen lukumäärä on rajoitettu seitsemään. [14]

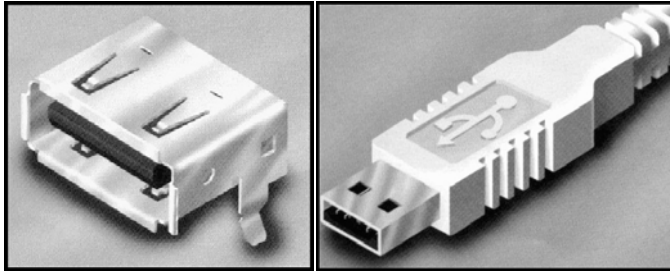
#### 2.4.1 Fyysinen siirtotie

USB-kaapelissa, joka on esitetty kuvassa 11, välitetään datan lisäksi käyttöjännite laitteelle. Kaapelissa on neljä johdinta, 5 V käyttöjännitteelle VBUS ja GND sekä differentiaaliselle datalle D+ ja D-. High Speed (480 Mbit/s) ja Full Speed (12 Mbit/s) tiedonsiirtonopeuksissa datalinjojen tulee olla kierretty pari. Kaapelissa on lisäksi suojavaippa.

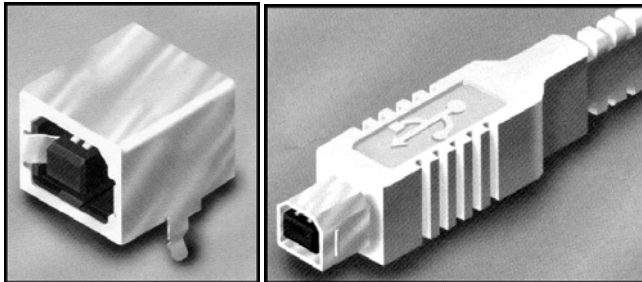


Kuva 11. USB kaapeli. [14]

Alkuperäinen USB 2.0 spesifikaatio määritteli liittimiksi A- ja B-tyyppiset liittimet jotka on esitetty kuvissa 12 ja 13. A-tyypin naarasliitin on toistimessa oleva liitin joten A-tyypin uros kytketään laitteesta toistimeen päin. B-tyypin naarasliitin on laitteessa jolloin B-tyypin urosliitin kytketään toistimesta laitteeseen päin.



Kuva 12. USB A-tyypin naaras- ja urosliitin [14]



Kuva 13. USB B-tyypin naaras- ja urosliitin [14]

USB:tä käyttävien laitteiden kirjon kasvaessa spesifikaatioon on lisätty pienemmät Mini- ja MicroUSB -liittimet esimerkiksi kännyköille ja muille kannettaville laitteille. Monet valmistajat ovat tehneet omiin laitteisiinsa fyysisesti erilaisia liittimiä, jotka soveltuvat vain käytettävään laitteeseen, vaikka signaalointi vastaisikin USB:tä.

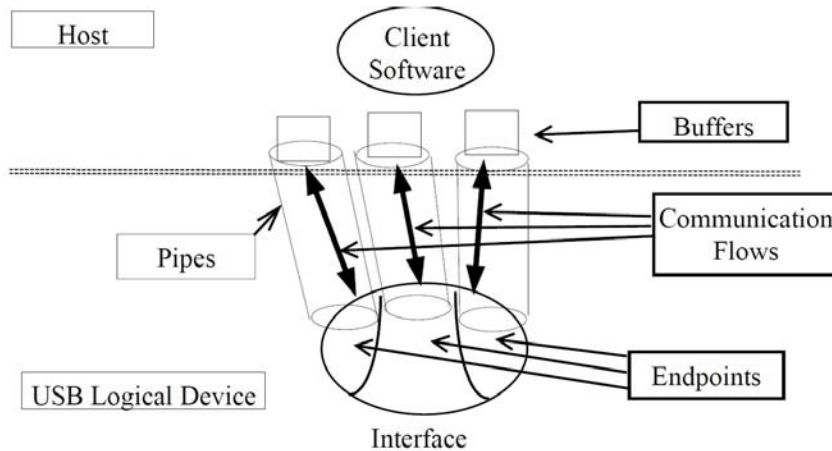
Spesifikaatio määrittelee kaapelin maksimiviveeksi 26 ns. Tämä tarkoittaa sitä, että kun kuparikaapelin nopeuskerroin on 0,66 c, kaapelin maksimipituus on 5 m. [14]

#### 2.4.2 USB-laite

USB-laitteella tarkoitetaan laitetta joka kytketään USB-kontrolleriin. Tällaisia laitteita ovat toistimet, erilaiset funktiot kuten digitaaliset kamerat, tulostimet jne. Toistin eroaa muista laitteista siinä, että se tarjoaa lisää liityntäpisteitä USB-järjestelmään.

USB-järjestelmässä kontrolleri kommunikoi laitteiden kanssa laitteille annetun osoitteen perusteella. Kontrolleri jakaa laitteelle osoitteen kun laite on kytketty ja tunnistettu. USB-laitteen tulee tukea yhtä tai useampaa ns. putkea (kuvassa 14) jonka läpi kontrolle-

ri kommunikoi laitteen kanssa. Ensimmäinen putki on kytketty päätepisteeseen 0 (end-point zero) mitä kautta tapahtuu laitteen konfigurointi ja ohjaus. [14]



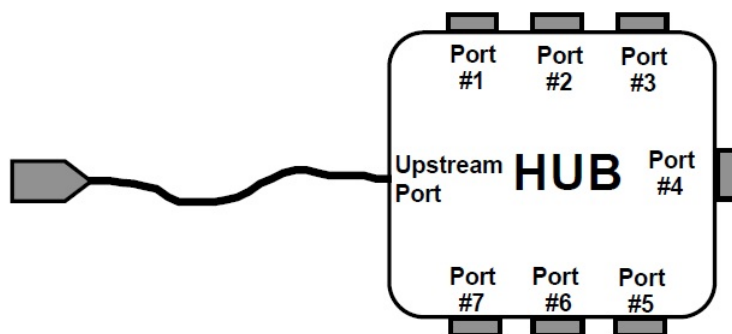
Kuva 14. Putket ja päätepisteet USB järjestelmässä [14]

Laitteen päätepisteestä 0 tulee löytyä seuraavat kategoriat konfigurointia varten:

- Yleinen: Kaikille USB-laitteille yhteiset tiedot kuten valmistajan tiedot, laitteen luokka, virranhallintaominaisuudet ja muiden päätepisteiden tyypit ja numerot.
- Luokka: Sisältää luokkakohtaista tietoa laitteesta. Muoto riippuu luokasta.
- Valmistaja: Sisältää valmistajan vapaavalintaista tietoa. Spesifikaatio ei määrittele tämän kategorian muotoa.

### 2.4.3 Toistin

USB-laitteissa on kaksi pääluokkaa, toistin ja funktio. Toistimet ovat avainasemassa USB:n Plug-and-Play-tyyppisessä arkkitehtuurissa ja ne mahdollistavat helpon liitettävyyden controllerin ja laitteiden välillä. Toistimen avulla saadaan yhdestä liityntäpisteestä useampia liityntäpisteitä joita kutsutaan porteiksi. Portteihin voidaan kytkeä toisia toistimia tai funktioita. Toistimet tunnistavat laitteen liittämisen ja irrottamisen ja pystyvät ohjaamaan käyttöjännitteen porttiin johon laite kytketään. Kuvassa 15 on esitetty tyypillinen toistin. [14]



Kuva 15. Tyypillinen USB-toistin [14]

USB 2.0 toistin koostuu kolmesta pääkomponentista: kontrolleri, toistin (repeater) ja tapahtumakääntäjä (transaction translator). Toistin on protokollan kautta ohjattu kytkin, joka yhdistää laitteen portista tulevan liikenteen ylöspäin menevään porttiin. Kontrolleri kommunikoi isäntäkontrollerin kanssa ja mahdollistaa sen että isäntä pystyy kontrolloimaan toistinta ja siihen kytkettyjä laitteita. Tapahtumakääntäjä mahdollistaa hitaampien low- ja full-speed nopeusluokan laitteiden toimimisen toistimessa, vaikka toistimen ja kontrollerin välinen yhteys on aina High Speed USB 2.0 järjestelmässä. [14]

#### 2.4.4 Funktio

Funktio on USB-laite joka pystyy lähettämään, vastaanottamaan tai kontrolloimaan tietoa väylällä. Funktio on yleensä toteutettu erilliseksi fyysiseksi lisälaitteeksi, joka kytketään toistimeen kaapelilla. Toisaalta fyysinen laite voi sisältää useampia funktioita ja toistimen, jolloin sitä kutsutaan yhdistelmälaitteeksi.

Jokainen funktio sisältää konfiguraatitiedon, joka määrittelee laitteen ominaisuudet ja resurssien tarpeen. Ennen kuin funktiota voidaan käyttää, tulee kontrollerin konfiguroida laite. Konfigurointi sisältää resurssien jaon ja funktiospesifisen asetusten käyttöönoton. [14]

#### 2.4.5 Päätepiste

Kaikki kommunikaatio laitteen ja isäntäkontrollerin välillä tapahtuu yksisuuntaisten päätepisteiden kautta. Laitteen päätepisteet ja niille annetut numerot sekä tiedonkulun suunta määritetään laitteen suunnitteluvaiheessa. Jokaisella laitteella on osoite jonka kontrolleri antaa laitteelle kytkentävaiheessa. Kun laitteella on osoite ja päätepisteellä

ennalta annettu numero, voidaan mihin tahansa laitteen päätepisteeseen viitata isäntä-kontrollerin toimesta. Päätepisteen ominaisuudet ovat:

- Väylän käyttötaajuus / viivevaatimukset
- Kaistanleveysvaatimukset
- Päätepisteen numero
- Virheenkäsittelyvaatimukset
- Suurin paketin koko mitä päätepieste pystyy vastaanottamaan tai lähettämään
- Tiedonsiirtotyyppi
- Tiedonsiirron suunta (laitteesta isännälle tai isännältä laitteelle)

Päätepieste 0 on pakollinen sen toimiessa oletuspäätepiesteenä joka sisältää konfiguraatio-tiedot, joilla kontrolleri konfiguroi laitteen. Muita päätepiesteitä voi olla maksimissaan 15 sisäänpäin ja 15 ulospäin. [14]

#### 2.4.6 Laitteen liittäminen

Ennen kuin laite on toimintakunnossa, vaaditaan siltä alustustoimenpiteet ja konfigurointi. Laitteen kytkemisen ja laitteen toimintakunnossa olemisen välillä laitteella on useita eri tiloja. USB-laitteen tilat on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. USB laitteen tilat [14]

Liitetty	Jännite	Oletus	Osoite	Konfiguroitu	Pysäytetty	Tila
Ei	-	-	-	-	-	Laite ei ole liitetty USB-väylään
Kyllä	Ei	-	-	-	-	Liitetty väylään, mutta ei jännitettä
Kyllä	Kyllä	Ei	-	-	-	Liitetty, jännitteessä mutta ei resetoitu
Kyllä	Kyllä	Kyllä	Ei	-	-	Resetoitu, ilman osoitetta, vastaa oletusosoitteeseen
Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Ei	-	Osoite annettu, mutta ei konfiguroitu
Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Ei	Toimintakunnossa
Kyllä	Kyllä	-	-	-	Kyllä	Pysäytetty

Kun laite liitetään USB-väylään, suoritetaan seuraavat toimenpiteet

1. Toistin johon laite kytketään, ilmoittaa isäntäkontrollerille muutoksesta jossain sen porteista. Tässä vaiheessa USB laite on ”Jännite” –tilassa mutta toistimen portti on vielä pois käytöstä.
2. Isäntäkontrolleri määrittelee muutoksen laadun kysymällä tätä toistimelta.
3. Kun isäntä tietää portin johon laite on kytketty, se odottaa 100 ms jotta laitteen liittäminen saadaan suoritettua loppuun ja käyttöjännite stabiloituu. Tämän jälkeen isäntä antaa toistimelle käskyn avata portti ja lähettää resetoitikäskyn porttiin.
4. Laite on nyt ”Oletus” –tilassa ja voi kuluttaa maksimissaan 100 mA virtaa. Laite vastaa oletusosoitteessa.
5. Isäntä jakaa uniikin osoitteen laitteelle siirtäen laitteen ”Osoite” –tilaan.
6. Ennen kuin laite saa osoitteen, sen oletuspäätepiste eli päätepiste 0 voidaan lukea vielä oletusosoitteesta. Isäntä lukee laitteen tiedot määrittääkseen minkä kokoista datapakettia oletuspäätepiste maksimissaan tukee.
7. Isäntä lukee laitteen konfiguraatitiedon.
8. Laite on nyt konfiguroitu ja sen päätepiestet on määritetty. Laite voi nyt kuluttaa virtaa niin paljon kuin sen konfiguraatitiedoissa on määritelty. Laite on käyttövalmis. [14]

#### 2.4.7 Tiedonsiirtotyypit

USB-spesifikaatio määrittelee neljä tiedonsiirtotyyppiä erilaisiin käyttötarkoituksiin.

##### KONTROLLISIIRTO

Kontrollisiirto mahdollistaa pääsyn laitteen eri osiin ja se on tarkoitettu konfiguraatio/käsky/tila–tyyppisiin tapahtumiin, sen avulla pääsee käsiksi laitteen konfiguraatitietoihin ja pystyy ohjaamaan laitetta. Kontrollisiirto on jaettu kolmeen osaan, ensin asetuspaketti lähetetään isännältä laitteelle jossa isäntä pyytää jotain laitteelta, tämän jälkeen siirretään tarvittaessa dataa jompaankumpaan suuntaan ja lopuksi laite lähettää isännälle tilapaketin jossa ilmoittaa oliko tapahtuma onnistunut.

### ISOKRONINEN SIIRTO

Isokroninen siirto tarkoittaa tasaisin väliajoin, tasaisella nopeudella tapahtuvaa vi-  
kasietaista siirtoa. USB ympäristössä isokroninen siirto tarkoittaa seuraavaa:

- Taattu pääsy väylälle tietyn viiveen puitteissa.
- Taattu tasainen tiedonsiirtonopeus kunhan vain dataa on saatavilla.
- Virheen sattuessa ei uudelleenyritystä siirtää kyseistä datapakettia.

Isokronista tiedonsiirtotyyppiä käytetään yleensä reaaliaikaisen tiedon välittämisessä.  
Esimerkkejä tällaisesta on videokuvan tai äänen välittäminen.

### KESKEYTYSSIIRTO

Keskeytyssiirto on tarkoitettu laitteille jotka lähettävät tietoa väylälle harvoin, mutta  
vaativat mahdollisimman lyhyen viiveen. Keskeytyssiirron ominaispiirteitä ovat:

- Maksimaalinen prioriteetti siirrolle
- Virheen sattuessa uudelleen lähetyksen seuraavan jakson aikana

Koska tiedon siirto on lyhytkestoista ja verrattain harvaa, voidaan taata maksimaalinen  
prioriteetti ilman muiden siirtojen erityisempää häiriintymistä. Keskeytyssiirtotyyppiä  
käytetään yleisimmin esimerkiksi näppäimistöissä ja hiirissä.

### MASSASIIRTO

Massasiirtotyyppi on tarkoitettu laitteille joiden täytyy lähettää suuria määriä dataa  
mahdollisimman suurella tiedonsiirtonopeudella. Massasiirron ominaispiirteitä ovat:

- Vapaan kaistan käyttö väylällä
- Paketin uudelleenlähetyksen mikäli siirrossa tapahtui virhe.
- Datan siirtyminen muuttumattomana taattu, mutta kaistanleveys ja viive ei taat-  
tu.

Esimerkkejä tällaisesta siirtotyypistä ovat massamuistilaitteet. [14]

#### 2.4.8 Protokolla

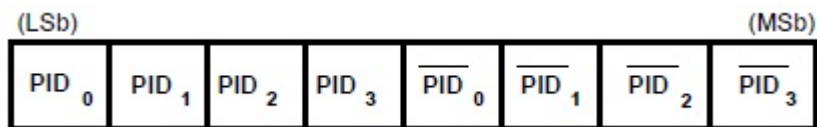
Kontrolleri aloittaa kaikki datasiirrot. Suurin osa tapahtumista väylällä tarvitsee kolme  
pakettia lähetettävän kontrollerin ja laitteen välillä. Jokainen tapahtuma alkaa, kun kont-  
rolleri lähettää ajastettuna Token-paketin, jossa on laitteen osoite, tapahtuman tyyppi,  
tiedonsiirron suunta ja päätepuoleen numero. USB laite, jolle paketti on osoitettu, de-  
koodaa osoitteensa dataväylältä ja vastaanottaa paketin. Paketissa määritelty data tai

tieto siitä että dataa ei ole saatavilla, siirretään laitteen ja isännän välillä, jonka jälkeen vastaanottava pää lähettää tiedon kättelypaketilla siirron onnistumisesta tai epäonnistumisesta.

Jokainen paketti väylällä alkaa synkronointikentällä. Synkronointi on koodattu bittikuvio jonka avulla vastaanottava laite synkronoi oman kellonsa väylän kellotaajuuteen pakettia vastaanottaessaan. Low- ja Full-Speed nopeuksille synkronointikenttä on 8 bittiä ja High-Speed nopeudelle 32 bittiä. Synkronointikentän kaksi viimeistä bittiä on merkki että synkronointi loppuu ja varsinainen paketti alkaa. [14]

### **PID**

Packet Identifier Field, eli paketin tunnistekenttä on 4-bittinen koodi, joka kertoo paketin tyyppin. Kuvassa 16 esitetty PID lähetetään 8-bittisenä, josta neljä jälkimmäistä bittiä ovat tarkistusbittejä joilla varmistutaan että PID on oikein. Kuvassa 17 on esitetty PID-koodien merkitys



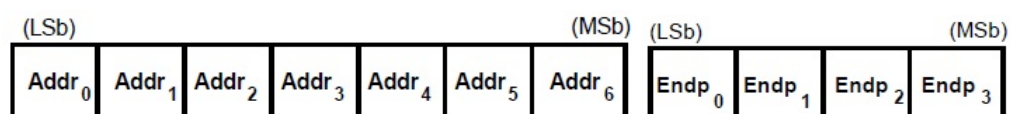
Kuva 16. PID-kenttä [14]

PID Type	PID Name	PID<3:0>*	Description
Token	OUT	0001B	Address + endpoint number in host-to-function transaction
	IN	1001B	Address + endpoint number in function-to-host transaction
	SOF	0101B	Start-of-Frame marker and frame number
	SETUP	1101B	Address + endpoint number in host-to-function transaction for SETUP to a control pipe
Data	DATA0	0011B	Data packet PID even
	DATA1	1011B	Data packet PID odd
	DATA2	0111B	Data packet PID high-speed, high bandwidth isochronous transaction in a microframe (see Section 5.9.2 for more information)
	MDATA	1111B	Data packet PID high-speed for split and high bandwidth isochronous transactions (see Sections 5.9.2, 11.20, and 11.21 for more information)
Handshake	ACK	0010B	Receiver accepts error-free data packet
	NAK	1010B	Receiving device cannot accept data or transmitting device cannot send data
	STALL	1110B	Endpoint is halted or a control pipe request is not supported
	NYET	0110B	No response yet from receiver (see Sections 8.5.1 and 11.17-11.21)
Special	PRE	1100B	(Token) Host-issued preamble. Enables downstream bus traffic to low-speed devices.
	ERR	1100B	(Handshake) Split Transaction Error Handshake (reuses PRE value)
	SPLIT	1000B	(Token) High-speed Split Transaction Token (see Section 8.4.2)
	PING	0100B	(Token) High-speed flow control probe for a bulk/control endpoint (see Section 8.5.1)
	Reserved	0000B	Reserved PID

Kuva 17. PID-koodit [14]

### Osoitekenttä

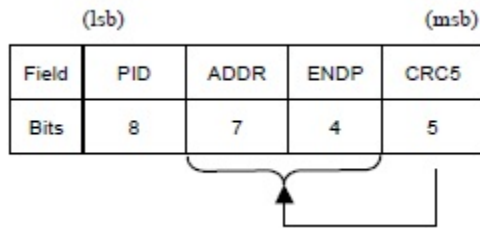
Osoitekenttä koostuu kahdesta erillisestä kentästä. 7 bittisestä osoitekentästä sekä 4 bit-tisestä päätepiestikentästä. Osoitekenttä on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Osoite- ja päätepiestikenttä [14]

### Token-paketti

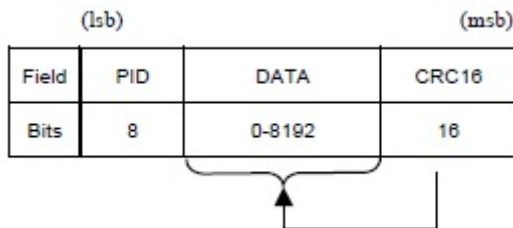
Jokainen datasiirto alkaa kontrollerin lähettämällä Token-paketilla, joka sisältää PID:n, osoitekentät sekä 5-bittisen CRC-virheentarkistuksen. Virheentarkistus koskee vain osoitekenttiä koska PID-kentässä on jo virheentarkistus itsessään. Token-paketin rakenne on esitetty kuvassa 19.



Kuva 19. Token-paketti [14]

### Datapaketti

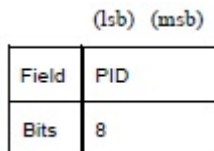
Datapaketti voi sisältää maksimissaan 1024 tavua, eli 8192 bittiä. Datapaketti alkaa PID-kentällä, sen jälkeen tulee data ja datalle 16-bittinen CRC virheentarkistus. Datapaketin rakenne on esitetty kuvassa 20.



Kuva 20. Datapaketti [14]

### Kättelypaketti

Kuvassa 21 esitetty kättelypaketti sisältää pelkästään PID-kentän.

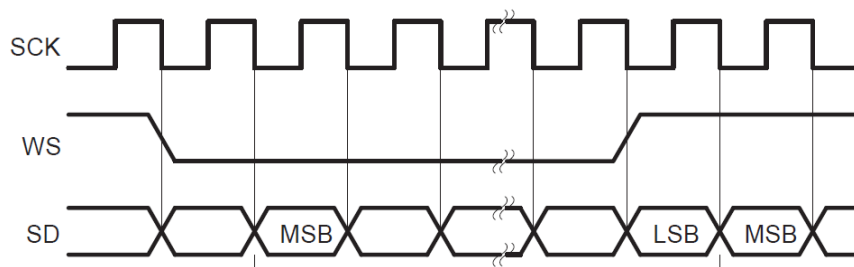


Kuva 21. Kättelypaketti [14]

## 2.5 I<sup>2</sup>S-väylä

Digitaalisen äänen yleistyessä kehitettiin I<sup>2</sup>S-väylästandardi jonka päätarkoitus on määrittellä liityntä eri komponenttien, kuten AD/DA muuntimien, digitaalisten suotimien ym. välille laitteen sisällä. I<sup>2</sup>S on kehitetty ensisijaisesti PCM muotoiselle äänisignaali- ja lähtökohtina suunnittelulle on ollut yksinkertaisuus ja matala jitter.

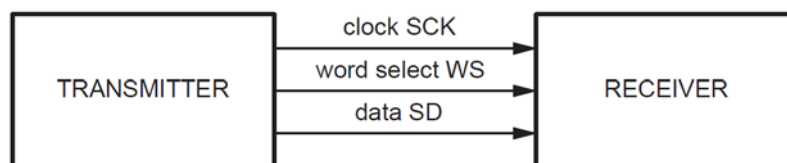
I<sup>2</sup>S-väylä koostuu kolmesta johtimesta. Sarjamuotoisesta multipleksoidusta datalinjasta, Word Select -kellosta sekä SCK:sta, eli jatkuvasta sarjakellosta jota kutsutaan toisinaan myös nimellä BitClock. SCK on kello jokaiselle databitille jota dataväylässä siirtyy. Word Select määrittää, kummanko äänikanavan dataa siirretään, Word Select 0 on kanava 1 eli vasen äänikanava, Word Select 1 on kanava 2 eli oikea äänikanava. [5]



Kuva 22. I<sup>2</sup>S-väylä [5]

Väyläarkkitehtuuri ei ota kantaa ääninäytteiden bittileveyteen. Väylän bittileveyden määrittää se, montako SCK-kellojaksoa Word Select on. Datan lähetysjärjestys on eniten merkitsevä bitti ensiksi. Mikäli lähetettävä ääninäyte on pienempi kuin Word Select, asetetaan vähiten merkitsevän bitin jälkeiset bitit nolleksiksi. Eniten merkitsevä bitti lähetetään yksi SCK-kellopulssi Word Selectin muutoksen jälkeen. [5]

Väylässä voi olla kolme erilaista konfiguraatiota, jotka on esitetty kuvissa 23, 24 ja 25. Lähettävä pää toimii isäntänä jolloin se määrittää kellosignaalit.



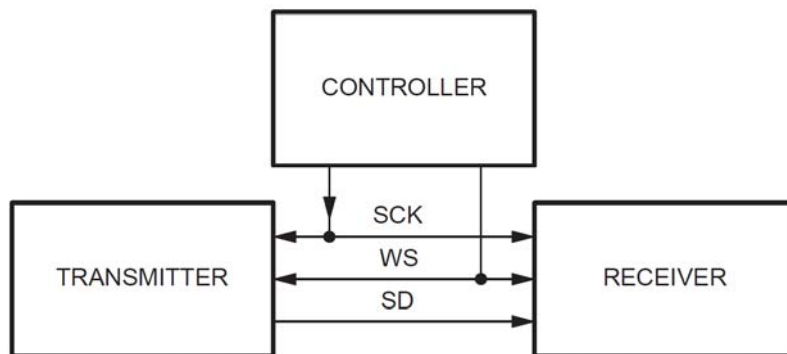
Kuva 23. Lähettäjä toimii isäntänä. [5]

Vastaanotin voi myös toimia isäntänä jolloin se määrittää kellosignaalit.



Kuva 24. Vastaanottaja toimii isäntänä. [5]

Isäntänä voi toimia myös erillinen kontrolleri, joka määrittelee kellosignaalit.

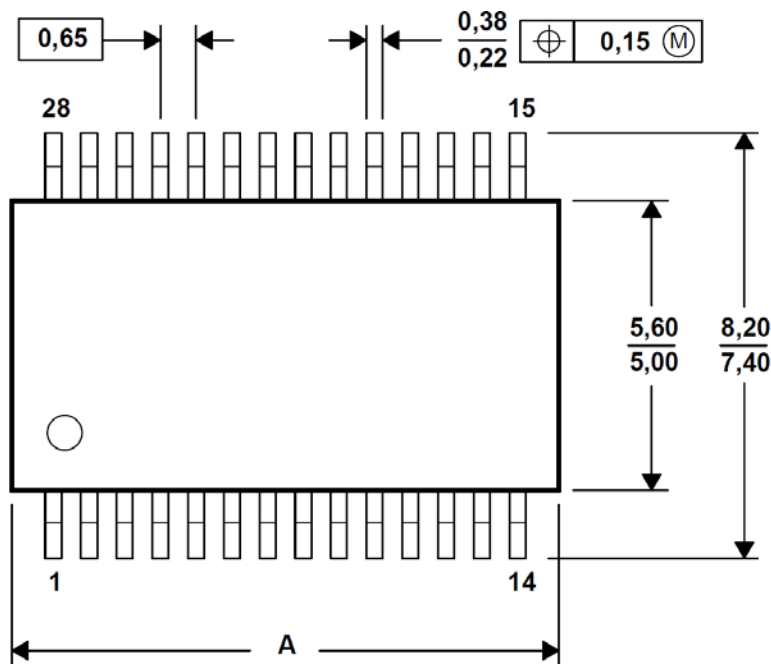


Kuva 25. Erillinen kontrolleri isäntänä. [5]

## 3 LAITE

Tarkoituksena oli suunnitella laite, joka muuntaa digitaalisen äänisignaalin analogiseksi linjatasoiseksi äänisignaalksi. Laitteessa on sisääntulot optiselle S/PDIF-signaalille sekä USB:lle. Ulostuloina ovat RCA-liittimet vasemman ja oikean kanavan linjatasoiselle äänisignaalille. Tavoitteena oli saada valmis toimiva laite, joka pärjää suorituskykyvertailussa kaupallisille DA-muuntimille.

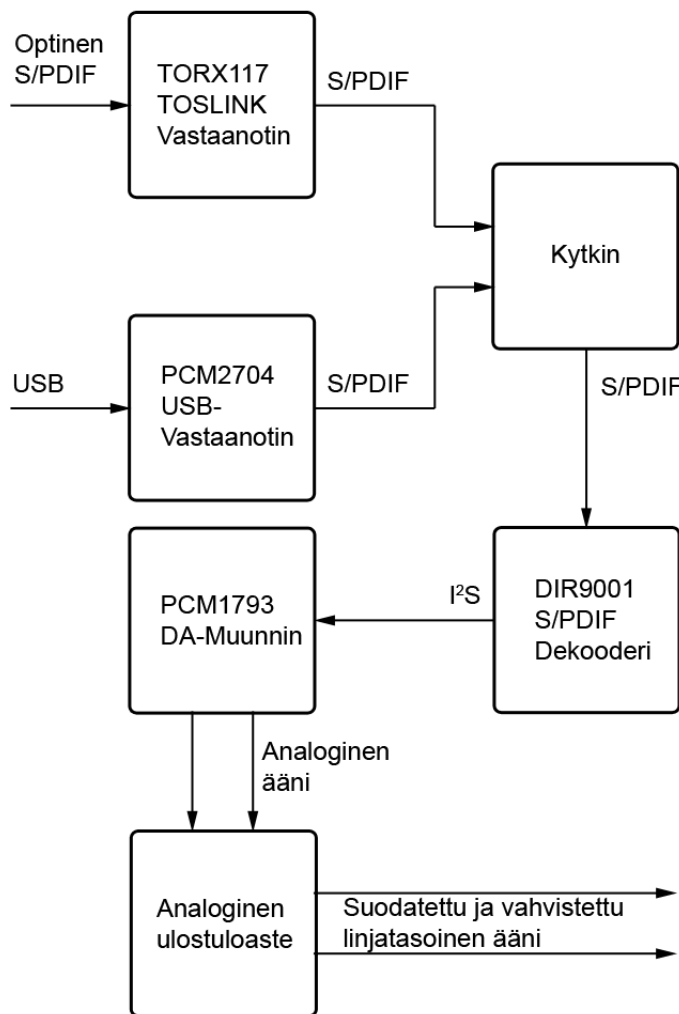
Laitteen suunnittelu alkoi piirien valinnalla. Kriteereinä piirivalinnoille olivat suorituskyky ja saatavuus. Koska piirilevyt tehdään ja laite kootaan ns. kotikonstein, oli piirien fyysinen koko ja kytkennän yksinkertaisuus myös tärkeä ottaa huomioon. Käytettäviksi piireiksi valikoitui lopulta Texas Instrumentsin valmistamat PCM1793 DA-muunninpiiri, PCM2704 USB-vastaanotinpiiri sekä DIR9001 dekooderipiiri. Kaikki kolme ovat SSOP28-paketoituja IC-piirejä.



Kuva 26. SSOP28 fyysiset mitat. [9]

Kuvassa 26 on esitetty SSOP28 paketoitun IC-piirin fyysiset mitat. Mitat ovat millimetrejä. SSOP28-paketoitussa piirissä A on 9,90 – 10,50 mm.

Piirien valitsemisen ja datalehtiin perehtymisen jälkeen ruvettiin suunnittelemaan kytkentää. IC-piirien oheiskomponenttien määrä on melko vähäinen, sisältäen muutamia vastuksia ja käyttöjännitteen suotokondensaattoreita, joten piirien kytkentänä käytettiin suurelta osin datalehtien esittämiä suosituskytkentöjä. Kun oli käsitys siitä miten kytkentä toteutetaan, valittiin myös loput komponentit, optinen vastaanotin TORX177, optoerotin ACPL-W70L, virtalähteen regulaattorit sekä analogisen ulostuloasteen operaatiovahvistin OPA2134. Kuvassa 27. on esitetty laitteen lohkokaavio.



Kuva 27. Laitteen lohkokaavio

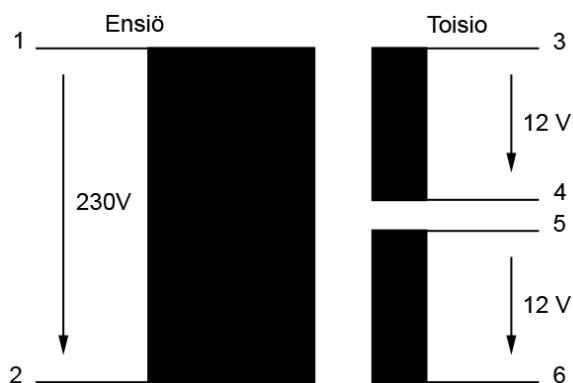
Optinen S/PDIF-signaali muunnetaan TORX177-vastaanottimella sähköiseksi S/PDIF-signaaliksi. Myös USB-äänisignaali muunnetaan S/PDIF-signaaliksi PCM2704 USB-vastaanottimen avulla. Tämän jälkeen signaalit syötetään valintakytkimen kautta DIR9001 S/PDIF-dekooderille, joka tunnistaa signaalin näytteenottotaajuuden ja muuttaa äänisignaalin I<sup>2</sup>S-väylälle. I<sup>2</sup>S-väyläinen data syötetään PCM1793 DA-muuntimelle, joka suorittaa varsinaisen DA-muunnoksen. DIR9001 generoi myös S/PDIF-signaalin näytteenottotaajuudesta kellosignaalin DA-muuntimelle. Analoginen ääni johdetaan DA-muuntimelta analogiseen ulostuloasteeseen, jossa signaali alipäästösuodatetaan ja vahvistetaan linjatasoiseksi.

Alun perin oli tarkoitus tehdä jokainen osa laitetta eri piirilevyille jolloin vian etsiminen ja korjaaminen olisi ollut helppoa. Käytännön kokemus kuitenkin osoitti, että näin ei ollut, vaan hyppylankojen suuri määrä hankaloitti testaamista ja kokoamista. Itse asiassa, ainakin DIR9001-piiri saatiin hajotettua kerran kun ilmeisesti piirilevyn maajohto irtosi testausvaiheessa. Näistä syistä johtuen päätettiin koko DA-muunnin suunnitella yhdelle piirilevyille. Teholähteelle suunniteltiin oma piirilevy.

Teholähteen kytkentäkaavio ja piirilevykuva on esitetty liitteessä 1. Liitteessä 2 on DA-muunninlaitteen kytkentäkaavio ja piirilevykuva. Osaluettelot DA-muunninlaitteesta ja teholahteesta on esitetty liitteessä 3 ja 4.

### 3.1 Teholähde

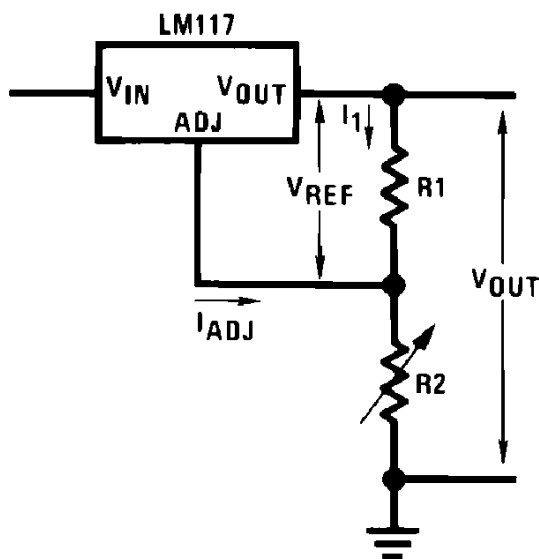
Jännitelähteessä käytettiin muuntajana Muuntosähkö Oy:n valmistamaa TF-40 mallista rengassydänmuuntajaa. Muuntajassa on kuvan 28 mukaisesti 230 V ensiökäämi ja kaksi 12 V toisiokäämiä. Muuntajan nimellisteho on 40 VA.



Kuva 28. Rengassydänmuuntajan käämijärjestys.

Muuntajan toisiokäämien johtimet 4 sekä 5 kytetään yhteen ja tässä pisteessä on tehollähteen maataso. Johtimien 3 ja 6 välinen vaihtojännite kokoaaltotasasuunnataan sekä suodatetaan suotokondensaattoreilla. Tasasuuntausdiodeina käytettiin Vishayn valmistamia schottky-diodeita. Jotta laitteen analoginen suorituskyky olisi mahdollisimman hyvä, tulisi jännitelähteen rippelijännitteen ja kohinan olla mahdollisimman pieni. Tästä syystä valittiin isot 10 000 uF kondensaattorit suotokondensaattoreiksi.

Laite tarvitsee neljä eri jännitettä, 3,3 V, 5V, +10 V ja -10 V. Jännitteet luodaan regulaattoreilla. Ensin luodaan +10 V ja -10V käyttöjännitteet operaatiovahvistimelle. Tähän käytetään National Semiconductorin säädettäviä LM317 ja LM337 regulaattoreita. Regulaattoreilla ei ole muuta eroa kuin se, että LM317 on positiiviselle jännitteelle ja LM337 negatiiviselle jännitteelle.



Kuva 29. LM317 kytkentä. [8]

Kuvan 29 mukaisesti regulaattori luo  $V_{OUT}$  ja ADJ pinnan väliin 1,25 V referenssijännitteen  $V_{REF}$ . Koska  $V_{REF}$  on vakio, myös virta  $I_{ADJ}$  on vakio, 50  $\mu$ A. Tällöin ulostulojännitteille saadaan kaavat

$$V_{OUT} = V_{REF} \left( 1 + \frac{R2}{R1} \right) + I_{ADJ}R2 \quad (1)$$

$$-V_{OUT} = -V_{REF} \left( 1 + \frac{R2}{R1} \right) + (-I_{ADJ}R2) \quad (2)$$

[8]

Valittiin R1 arvoksi 240  $\Omega$  ja R2 arvoksi 1,8 k $\Omega$  jolloin ulostulojännitteiksi saadaan

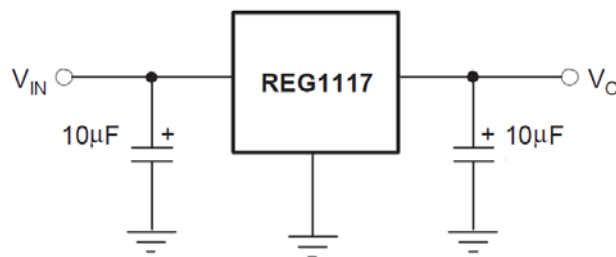
$$V_{OUT} = 1,25 \left( 1 + \frac{1800\Omega}{240\Omega} \right) + 50 \cdot 10^{-6} \cdot 1800\Omega = 10,715 \text{ V}$$

$$-V_{OUT} = -1,25 \left( 1 + \frac{1800\Omega}{240\Omega} \right) + (-50 \cdot 10^{-6} \cdot 1800\Omega) = -10,715 \text{ V}$$

Negatiivista jännitettä käytetään operaatiovahvistimen negatiiviseen käyttöjännitteeseen sekä jänniteindikaattorilediin, joten se voisi olla mitä vain väliltä 4 V – 18 V, kunhan ledin etuvastus mitoitetaan sen mukaan.

Positiivista käyttöjännitettä käytetään operaatiovahvistimen positiiviseen käyttöjännitteeseen sekä 3,3 V ja 5 V regulaattorin käyttöjännitteeksi. Positiivinen jännite voisi olla mitä vain väliltä 6,2 V – 15 V, joka on 5 V regulaattorin käyttöjänniteväli.

3,3 V ja 5 V regulaattoreina käytetään Texas Instrumentsin REG1117-3.3 ja REG1117-5 malleja. Regulaattorit vaativat 1,2 V suuremman sisääntulojännitteen verrattuna ulostuloon ja ne pystyvät antamaan virtaa 800 mA. Suurin sisääntulojännite on 15 V. Koska regulaattoreissa on kiinteä ulostulojännite, ovat ne erittäin yksinkertaisia käyttää, kuten kuvasta 30 nähdään. [11]



Kuva 30. REG1117 kytkentä [11]

Koska suoraan suotokondensaattorilta saatava jännite on liian suuri 3,3 V ja 5 V regulaattoreiden käyttöjännitteeksi, otetaan regulaattoreiden käyttöjännite +10 V linjasta.

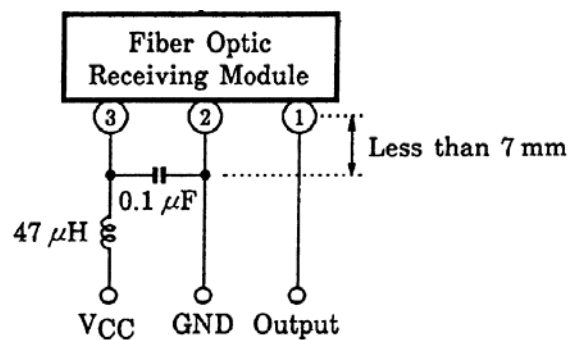
Ensimmäisen kerran kun virtalähdettä testattiin, havaittiin ongelma jossa verkkojännitteen katkaisemisen jälkeen positiiviset jännitteet laskivat -0,5 volttiin, josta ne palautuivat jonkun ajan päästä nollassi. Syyksi tähän todettiin epäsymmetrinen kuorma suotokondensaattoreilla, eli positiivisen puolen kondensaattorilla on suurempi kuorma jolloin se tyhjenee nopeammin kuin negatiivisen puolen kondensaattori.

Kun negatiivisen puolen kondensaattorissa on vielä jännitettä, se nostaa maatasoa verrattuna positiiviseen jännitteeseen mikä näkyy positiivisissa ulostuloissa negatiivisena jännitteenä. Korjauksena laitettiin schottky-diodi LM317 regulaattorin jälkeen estämään virran kulku väärään suuntaan. Lisättiin myös negatiivisen suotokondensaattorin rinnalle  $680 \Omega$  kuormavastus sekä virtaindikaattoriledi tasoittamaan kuormaa.

### 3.2 Vastaanotinmoduuli

#### 3.2.1 Optinen sisääntulo

Optisen siirtotien etu sähköiseen siirtotiehen verrattuna on laitteiden välinen galvaaninen erotus. Signaalia lähettävä laite ei siis ole sähköisesti yhteydessä vastaanottavaan laitteeseen. Tällä vältytään siltä, että signaalin mukana kulkeutuisi lähettävästä laitteesta häiriöitä, jotka saattaisivat vaikuttaa herkkään analogiosaan DA-muuntimessa. Galvaanisella erotuksella vältytään myös maalenkin muodostumiselta laitteiden välillä, maalenkki ilmenee analogisessa ulostulossa usein verkkotaajuisena, eli 50 Hz hurinana. Optinen sisääntulo toteutettiin Toshiba valmistamalla TORX177 TOSLINK-vastaanottimella.



Kuva 31. TORX177 kytkentäkaavio [13]

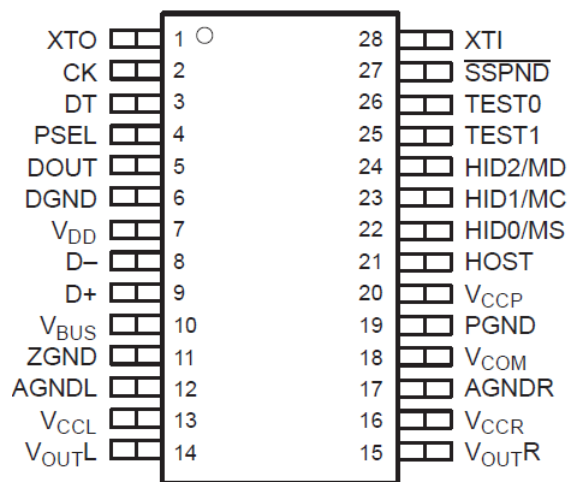
Vastaanottimen kytkentä on esitetty kuvassa 31 ja sen käyttö on erittäin yksinkertaista eikä vaadi kuin kelan sekä käyttöjännitteen suotokondensaattorin. Käyttöjännite on 5 V ja ulostulo on TTL tasoinen S/PDIF signaali. [13]

#### 3.2.2 USB sisääntulo

Nykypäivänä suuri osa musiikista toistetaan PC:n kautta. Kaikissa tietokoneissa ei ole suoraan liitintä äänen digitaaliselle ulostulolle, joten USB on ainoa tapa saada ääni digitaalisena ulos. Laitteessa käytettiin Texas Instrumentsin PCM2704-piiriä, joka on

USB 1.1 standardin täyttävä äänirajapinta ja se tukee 16 bitin resoluutiolla PCM koodattua ääntä 32 kHz:n, 44,1 kHz:n sekä 48 kHz:n näytteenottotaajuudella. Piirin käyttöjännite tulee USB-väylästä, mutta piiri voidaan konfiguroida ottamaan käyttöjännite myös ulkoisesta jännitelähteestä.

Piiri koodaa USB-väylältä tulevan äänen S/PDIF-signaaliksi. Piirissä on myös sisäänrakennettu DA-muunnin jolla saataisiin suoraan analoginen ääniulostulo, mutta sitä ei tässä työssä käytetä koska DA-muunnos tehdään erillispiirillä. Piiri ei tarvitse erillisiä ajureita vaan yleisimmät käyttöjärjestelmät tunnistavat sen suoraan äänilaitteena. Piirin pinnijärjestys on esitetty kuvassa 32. [10]



Kuva 32. PCM2704 pinnijärjestys [10]

#### XTO (1), XTI (28)

Piiri vaatii toimiakseen 12 MHz kideoskillaattorin. XTI ja XTO ovat kideoskillaattorin sisääntulo ja ulostulo. Kideoskillaattorin rinnalle kytketään 1 MΩ vastus ja kummastakin pinnistä 18 pF keraaminen kondensaattori maahan.

#### CK (2), DT (3)

Piiri tukee mahdollisuutta ohjelmoida oman Vendor ID:n sekä Product ID:n jonka piiri ilmoittaa PC:lle kytkemisen yhteydessä. Tämä voidaan toteuttaa erillisellä ROM-piirillä. CK on kelloulostulo ROM-piirille ja DT on datasisääntulo. Vendor ID on numero, jonka USB-IF myöntää organisaatiolle. Product ID on yrityksen laitteelle antama tunnusnumero.

Tässä työssä ei ole tarpeellista muuttaa oletusarvoja, jotka ovat Vendor ID:lle 0x08BB sekä Product ID:lle 0x2704. Vendor ID 0x08BB viittaa Texas Instruments Japan -yhtiöön.

#### PSEL (4)

PSEL –pinnillä valitaan, käytetäänkö USB-väylästä saatavaa käyttöjännitettä vai erillistä jännitelähdettä. Tässä työssä käytetään väylästä saatavaa jännitettä joten PSEL asetetaan ylös.

#### DOUT (5)

DOUT-pinnistä saadaan S/PDIF ulostulo.

#### DGND (6), VDD (7)

DGND on digitaalinen maa ja VDD digitaalinen jännitelähde. Mikäli käyttöjännitettä ei oteta USB-väylältä, kytketään 3,3 V käyttöjännite VDD pinniin. VDD kytketään maahan 1  $\mu$ F keraamisella kondensaattorilla.

#### D- (8), D+ (9)

USB-väylän differentiaalinen datalinja. D+ kytketään lisäksi 1,5 k $\Omega$  ylösvetovastuksella VDD:hen

#### V<sub>BUS</sub> (10)

Käyttöjännite USB-väylästä kytketään tähän pinniin.

#### ZGND (11)

ZGND on sisäisen regulaattorin maapinni.

#### AGNDL (12), AGNDR (17)

AGNDL ja AGNDR ovat analogisen vahvistimen oikean ja vasemman kanavan maapinnit.

#### V<sub>CCL</sub> (13), V<sub>CCR</sub> (16)

Nämä pinnit on kytketty analogiseen jännitelähteeseen vahvistimen vasemmalle ja oikealle kanavalle. Kytketään maahan 1  $\mu$ F keraamisella kondensaattorilla.

#### V<sub>OUTL</sub> (14), V<sub>OUTR</sub> (15)

Ulostuloja joista saadaan analoginen äänisignaali DA-muuntimelta.

**V<sub>COM</sub> (18)**

Puolet V<sub>CCP</sub> jännitteestä. Kytetään 10 µF elektrolyyttikondensaattorilla maahan.

**PGND (19), V<sub>CCP</sub> (20)**

V<sub>CCP</sub> on analoginen jännitelähde DA-muuntimelle, kideoskillaattorille sekä vaihelukitulle silmukalle. Kytetään maahan 1 µF keraamisella kondensaattorilla. PGND on tämän jännitelähteen maapinni.

**HOST (21)**

HOST-pinni on laitteen maksimivirrankulutuksen määrittely. Tulon ollessa alhaalla laite voi ottaa maksimissaan 100 mA USB-väylästä, ylhäällä maksimissaan 500 mA. Tässä työssä kytetään pinni maahan, eli laite voi ottaa maksimissaan 100 mA väylästä.

**HID0 (22), HID1 (23), HID2 (24)**

HID eli Human Interface Device on USB:n määritelmä, jossa ihminen voi kontrolloida tai muuttaa laitteen toimintaa. Tässä tapauksessa HID0 (ylhäällä aktiivinen) kontrolloi käyttöjärjestelmän Mute-toimintoa. HID1 ollessa ylhäällä äänenvoimakkuus käyttöjärjestelmästä kasvaa. Vastaavasti HID2 ollessa ylhäällä äänenvoimakkuus laskee. Tässä työssä laitteeseen ei toteuteta näitä kytkimiä, koska digitaalinen äänenvoimakkuuden säätö vaikuttaa vain piirin analogisiin lähtöihin.

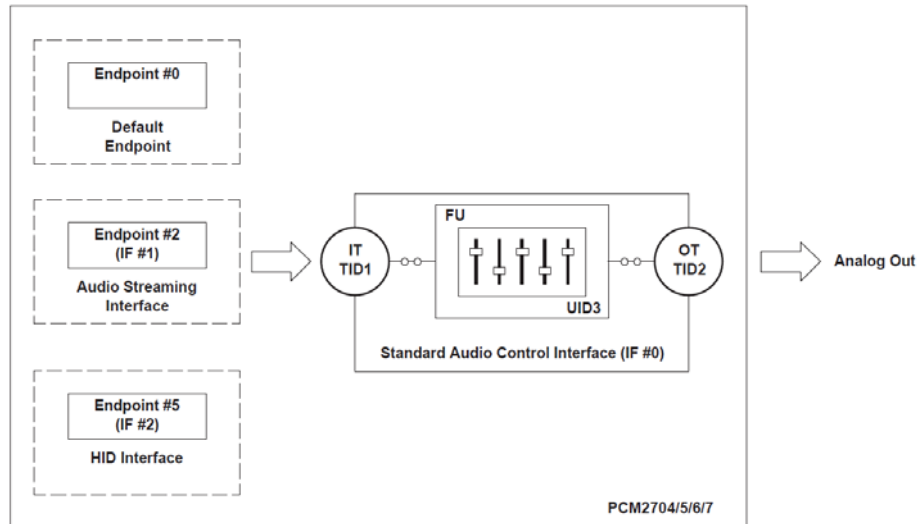
**TEST1 (25), TEST0 (26)**

Testipinnejä. Pinnit täytyy kytkeä ylös.

**SSPND (27)**

Suspend-lippu. Indikoi onko piiri suspend tilassa eli pysäytetty. Alhaalla piiri on pysäytetty. [10]

PCM2704 USB-ohjain sisältää kolme päätepistettä. Päätepiste 0 on USB spesifikaation mukaisesti oletuspäätepiste jonka kautta laitteen konfigurointi tapahtuu. Kuvan 33 mukaisesti päätepiste 2 on digitaalinen äänivirta, jonka tiedonsiirtotyyppi on isokroninen. Kolmas päätepiste, päätepiste 5 on HID-toimintoja varten ja tämä päätepiste on keskeytys siirto-tyyppinen.

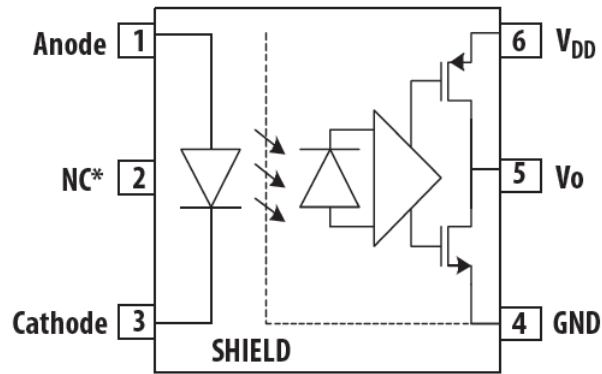


Kuva 33. PCM2704 USB-ohjain [10]

USB-ohjaimen äänikontrollerirajapinnassa on sisääntulo isokroniselle datalle (IT), DA-muuntimen digitaalinen vaimennin (FU) sekä analoginen ulostulo (OT). [10]

Koska PCM2704 ottaa käyttöjännitteensä USB-väylästä, on piirin ja kytkennän maataso samassa potentiaalissa siihen kytketyn PC:n kanssa. Mikäli PC on kytketty maadoittamattomaan pistorasiaan, virtalähteen häiriönpoistokondensaattoreiden takia PC:n maapisteen (rungon) ja sähköverkon todellisen maapisteen välillä on n.115 V vaihtojännite. Vaikka PC olisikin kytkettynä maadoitettuun pistorasiaan eikä jännite-eroa maatasojen välillä olisi, on PC:n maata kuitenkin häiriöinen. Näistä syistä USB:n maapistettä ja laitteen maata ei tule kytkeä yhteen.

Piiriltä lähtee S/PDIF ulostulo, joka kytketään lohkokaaavion mukaisesti kytkimen kautta DIR9001 dekooderille. Jotta S/PDIF signaalin maataso olisi samassa potentiaalissa laitteen maataso kanssa kytkemättä kuitenkaan USB:n maata ja laitteen maata yhteen, täytyy S/PDIF signaali erottaa optisesti. Tähän käytetään Avago Technologiesin valmistamaan ACPL-W70L optoerotinta, joka on nopeutensa vuoksi suunniteltu erilaisille tiedonsiirtoväylille. Optoerotin kykenee 15 Mbps symbolinopeuksiin. Koska USB-väylä tukee maksimissaan 48 kHz:n näytteenottotaajuutta, S/PDIF signaalin nopeusvaatimus optoerottimelle on tällöin n. 6,1 Mbps (kaksi 32 bitin alikehystä 48000 hertsin taajuudella BMC-koodattuna). [1]



Kuva 34. ACPL-W70L [1]

Kuvan 34 mukaisesti S/PDIF-signaali kytkettiin  $240\ \Omega$  virranrajoitusvastuksen kautta pinniin 1 ja USB:n maapiste pinniin 3.  $V_{DD}$  ja GND otettiin laitteen virtalähteestä ja niiden väliin kytkettiin  $100\ \text{nF}$  käyttöjännitteen suotokondensaattori.  $VO$  on ulostuleva S/PDIF-signaali. [1]

### 3.3 S/PDIF-dekooderi

S/PDIF-signaali täytyy dekodata  $I^2S$ -väylälle, joka on varsinaisen DA-muuntimen sisääntuloväylä. Tähän tarkoitukseen käytetään DIR9001-dekooderipiiriä. Sisääntuloformaattina piiri tukee BMC-koodattua äänisignaalia  $28\ \text{kHz} - 108\ \text{kHz}$ :n näytteenottotaajuudella. Ulostuloformaattina tässä työssä käytetään  $24$  bittistä  $I^2S$ -väylää. Piiri ei tarvitse erillistä kideoskillaattoria toimiakseen vaan se tunnistaa kellosignaalin sisään tulevas- ta datasta vaihelukitun silmukan avulla. Mikäli piiriin kytketään  $24,576\ \text{MHz}$ :n kideoskillaattori, piiri osaa laskea todellisen näytteenottotaajuuden. Tässä työssä ei tarvita näytteenottotaajuuden indikaattoria joten ulkoinen kideoskillaattori on jätetty pois käytöstä. Ulostuleva  $I^2S$ -väylän systeemikello on valittavissa arvoista  $128\ f_s$ ,  $256\ f_s$ ,  $384\ f_s$  ja  $512\ f_s$ , jossa  $f_s$  on sisääntulevan datan näytteenottotaajuus. Piirin pinnijärjestys on esitetty kuvassa 35. [3]

1	AUDIO	CKSEL	28
2	FSOUT0	ERROR	27
3	FSOUT1	FMT1	26
4	SCKO	FMT0	25
5	V <sub>DD</sub>	V <sub>CC</sub>	24
6	DGND	AGND	23
7	XTO	FILT	22
8	XTI	RST	21
9	CLKST	RXIN	20
10	LRCKO	RSV	19
11	BCKO	BFRAME	18
12	DOUT	EMPH	17
13	PSCK0	UOUT	16
14	PSCK1	COUT	15

Kuva 35. DIR9001 pinnijärjestys [3]

#### AUDIO (1)

Piiri lukee sisääntulevasta S/PDIF signaalista kanavatilabitin 1, joka ilmoittaa onko kyseinen näyte ääninäyte vai jotain muuta. Lähtö on alhaalla, mikäli näyte on lineaarinen PCM-näyte.

#### FSOUT0 (2), FSOUT1 (3)

Mikäli ulkoinen kideoskillaattori on kytketty, laskettu näytteenottotaajuus on luettavissa FSOUT0 ja FSOUT1 pinneistä.

#### SCKO (4)

Systeemikelloulostulo.

#### V<sub>DD</sub> (5), DGND (6)

Digitaalinen 3,3 V käyttöjännite ja digitaalinen maa.

#### XTO (7), XTI (8)

Ulkaisen kideoskillaattorin sisään- ja ulostulo. Ei käytetä tässä työssä.

#### CLKST (9)

CLKST ilmoittaa vaihelukitun silmukan tilanmuutoksen lukitun ja ei lukitun tilan välillä. CLKST on ylhäällä silloin kun signaali muuttuu lukitusta ei lukitukseksi, esimerkiksi kelloaajuuden vaihtumisen seurauksena. Menee alas kun signaali lukittuu uudestaan.

**LRCKO (10)**

LRCKO on I<sup>2</sup>S-väylän WS eli Word Select. Määrittää kummanko äänikanavan dataa siirretään.

**BCKO (11)**

BCKO on I<sup>2</sup>S-väylän bittikelloulostulo.

**DOUT (12)**

DOUT on I<sup>2</sup>S-väylän sarjamuotoinen dataulostulo.

**PSCK0 (13), PSCK1 (14)**

PSCK00 ja PSCK1 pinneillä määritellään vaihelukitun silmukan ulos antama SCKO systeemikellotaajuus. Tässä työssä molemmat asetetaan alas, jolloin systeemikellotaajuus on 128 fS, eli 128-kertainen näytteenottotaajuuteen nähden.

**COUT (15), UOUT (16)**

Sarjamuotoinen dataulostulo kanavatilabiteille (COUT) sekä käyttäjän biteille (UOUT).

Lähdöt on synkronoitu LRCKO kellon kanssa. Ei käytetä tässä työssä.

**EMPH (17)**

Piiri lukee kanavatilabitin 3 ja ilmoittaa sen. EMPH pinni alhaalla tarkoittaa, että signaalissa ei ole käytetty esikorostusta. Ei käytetä tässä työssä.

**BFRAME (18)**

BFRAME pinni nostetaan ylös 8:ksi LRCKO jaksoksi kun S/PDIF signaalissa havaitaan lohkon alku. Ei käytetä tässä työssä.

**RSV (19)**

Varattu, tämä pinni on kytkettävä maahan.

**RXIN (20)**

S/PDIF signaalin sisääntulo.

**RST (21)**

Reset pinni. Alhaalla aktiivinen. Piiri vaatii ulkoisen reset-piirin. Reset-piirinä käytettiin Microchip MCP120-300DI/TO reset-piiriä, joka pitää piirin resetin aktiivisena kunnes käyttöjännite nousee yli 3 V tason.

**FILT (22)**

Vaihelukitun silmukan vaatima analoginen suodatinpiiri kytketään FILT pinniin ja maahan.

**AGND (23), V<sub>CC</sub> (24)**

Pinnit ovat analoginen 3,3 V käyttöjännite ja maa vaihelukitulle silmukalle.

**FMT0 (25), FMT1 (26)**

FMT0 ja FMT1 ovat dekoodatun audiodatan ulostuloformaatin valintapinnejä. Kytetään kummatkin pinnit ylös, jolla valitaan ulostuloformaatiksi 24 bittinen I<sup>2</sup>S-väylä.

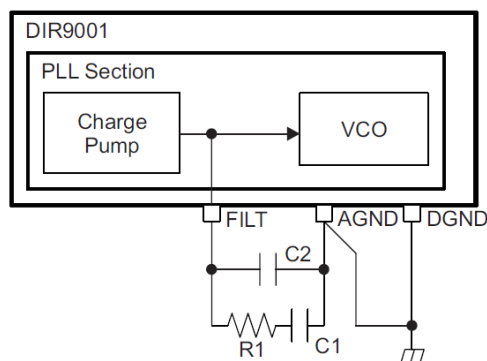
**ERROR (27)**

Nousee ylös mikäli datapariteetissa tai vaihelukitus silmukassa tapahtuu virhe.

**CKSEL (28)**

Kelloisääntulon valinta. Asetetaan tulo alas jolloin kellotaajuus saadaan sisääntulevasta datasta vaihelukitun silmukan avulla. [3]

Vaihelukittu silmukka vaatii suodatinpiirin toimiakseen varmatoimisesti.



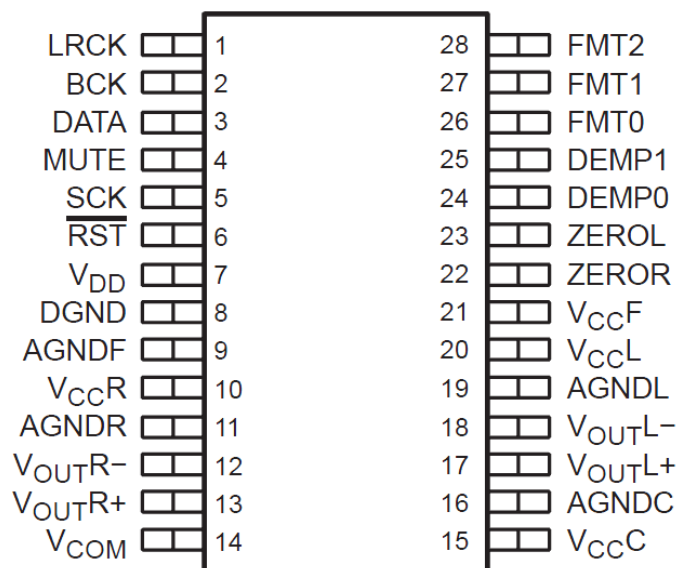
Kuva 36. Vaihelukitun silmukan suodatinosa. [3]

Komponentit tulee sijoitella mahdollisimman lähelle itse piiriä kuvan 36 mukaisesti. Arvoina komponenteille käytettiin R1 680 Ω, C1 68 nF ja C2 4,7 nF. [3]

DOUT, LRCKO, SCKO BCKO linjoihin laitettiin lisäksi  $33 \Omega$  virranrajoitusvastukset.

### 3.4 DA-muunnin

Laitteen keskeisin komponentti on PCM1793 DA-muunninpiiri, joka suorittaa varsinaisen DA-muunnoksen. Piiri tukee äänisignaalia 16, 20 ja 24 bitin resoluutiolla ja 10 kHz – 200 kHz näytteenottotaajuudella. PCM1793:n analoginen dynaaminen alue on 113 dB sekä kokonaisharmoninen särö ja kohina 0,001 %. Piirissä on differentiaaliset ulostulot analogiselle äänelle. Ulostulon huippuarvo on  $3,2 V_{pp}$ . Piirissä on 8-kertaisesti ylinäyteistävä digitaalinen alipäästösuodatin jonka estokaistan vaimennus on 82 dB ja päästökaistan ripple  $\pm 0,002$  dB. Päästökaistan leveys riippuu käytettävästä näytteenottotaajuudesta. PCM1793 tukee systeemikelloa 128, 192, 256, 384, 512, tai  $768 f_s$  taajuudella, jossa  $f_s$  on näytteenottotaajuus. Pinnijärjestys on esitetty kuvassa 37. [9]



Kuva 37. PCM1793 pinnijärjestys [9]

#### LRCK (1)

LRCK on I<sup>2</sup>S-väylän WS eli Word Select. Määrittää kummanko äänikanavan dataa siirretään.

#### BCK (2)

BCK on I<sup>2</sup>S-väylän bittikellosääntulo.

DATA (3)

DOUT on I<sup>2</sup>S-väylän sarjamuotoinen datasisääntulo.

MUTE (4)

Analogisen ulostulon mute-toiminnon ohjaus. Ylhäällä aktiivinen. Ei käytetä tässä työssä.

SCK (5)

Systeemikello jonka DIR9001 on luonut sisääntulleesta S/PDIF signaalista.

RST (6)

Reset. Alhaalla aktiivinen. On kytketty tässä työssä ylös.

V<sub>DD</sub> (7), DGND (8)

Sisääntulot digitaaliselle 3,3 V käyttöjänniteelle ja digitaaliselle maalle.

AGNDF (9), AGNDR (11), AGNDC (16), AGNDL (19)

Pinnit ovat piirin analogisia maapisteitä.

V<sub>CC</sub>R (10), V<sub>CC</sub>C (15), V<sub>CC</sub>L (20), V<sub>CC</sub>F (21)

Piirin analogiset 5 V käyttöjännitepisteet.

V<sub>OUT</sub>R- (12), V<sub>OUT</sub>R+ (13), V<sub>OUT</sub>L+ (17), V<sub>OUT</sub>L- (18)

Pinnit ovat piirin analogisen äänen differentiaaliset ulostulot.

V<sub>COM</sub> (14)

Sisäisen biasoinnin erotuspinni. Kytetään 1 µF elektrolyyttikondensaattorilla maahan.

ZEROR (22), ZEROL (23)

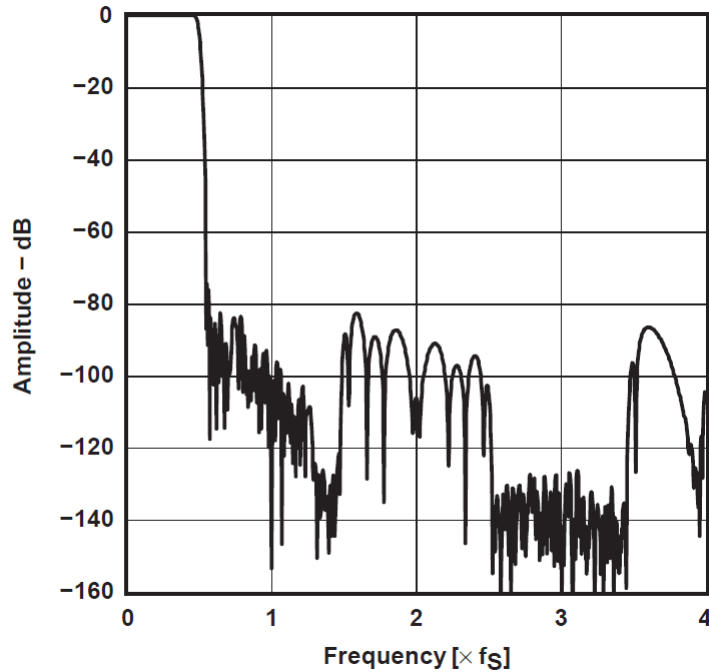
Mikäli sisääntuleva signaali on ollut yhtäjaksoisesti nollassa 1024 f<sub>s</sub> jakson ajan, ZEROR lippu nousee ylös oikealle kanavalle ja ZEROL lippu vasemmalle kanavalle. Toimivat toisistaan riippumattomina. Tässä työssä ei käytetä tätä ominaisuutta.

DEMP0 (24), DEMPI (25)

Jälkikorjauksen ohjaus. Jätetään tässä työssä kytkemättä jolloin jälkikorjausta ei suoriteta.

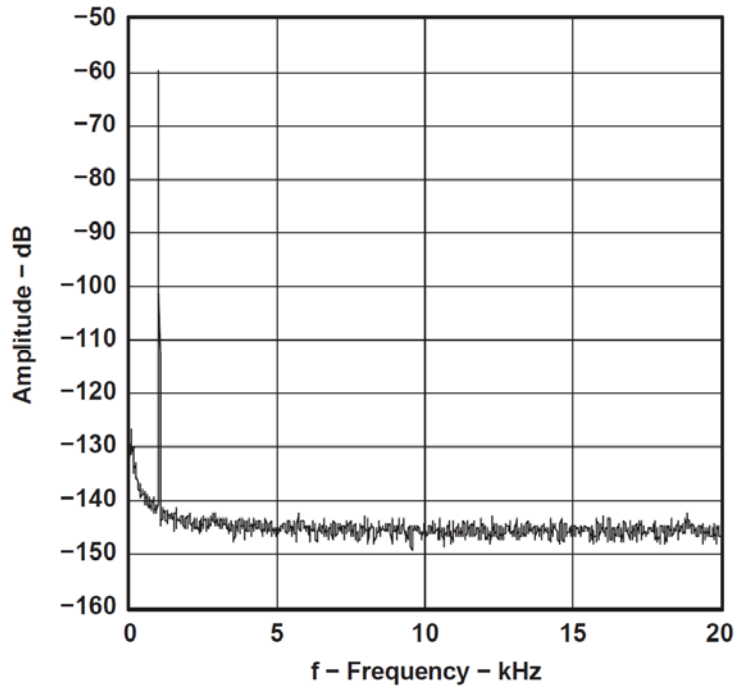
FMT0 (26), FMT1 (27), FMT2 (28)

Sisääntulevan dataformaatin valinta. Kytetään FMT0 ja FMT2 ylös sekä FMT1 alas, jolloin piiri ottaa vastaan 24 bittistä dataa I<sup>2</sup>S-väylällä, kuten on DIR9001-piirillekin määritelty. [9]



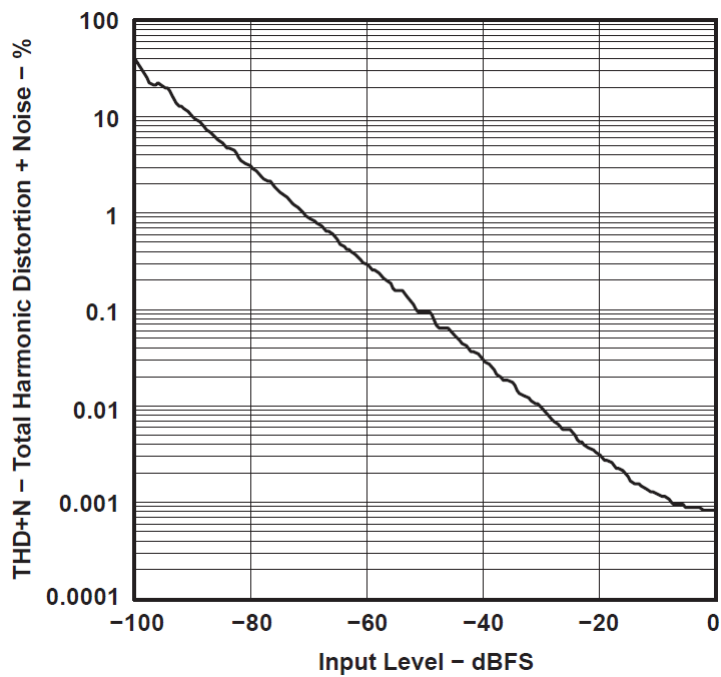
Kuva 38. Digitaalisen alipäästösuodattimen taajuusvaste [9]

Kuvssa 38 on esitetty PCM1793 digitaalisen suodattimen taajuusvaste. Pystyakselilla on vaimennus desibeleinä ja vaaka-akselilla taajuus, jossa kerrannaisena on näytteenottotaajuus. 44,1 kHz:n näytteenottotaajuudella nähdään että päästökaista ulottuu n. 22 kHz:n taajuudelle (0,5 fs).



Kuva 39. Analogisen ulostulon spektri 1 kHz sinisignaalilla. [9]

Kuvassa 39 on esitetty spektri piirin analogiulostulosta 1 kHz:n sinisignaalilla 44,1 kHz:n näytteenottotaajuudella -60 dB tasolla.



Kuva 40. Piirin kokonaisharmoninen särö ja kohina [9]

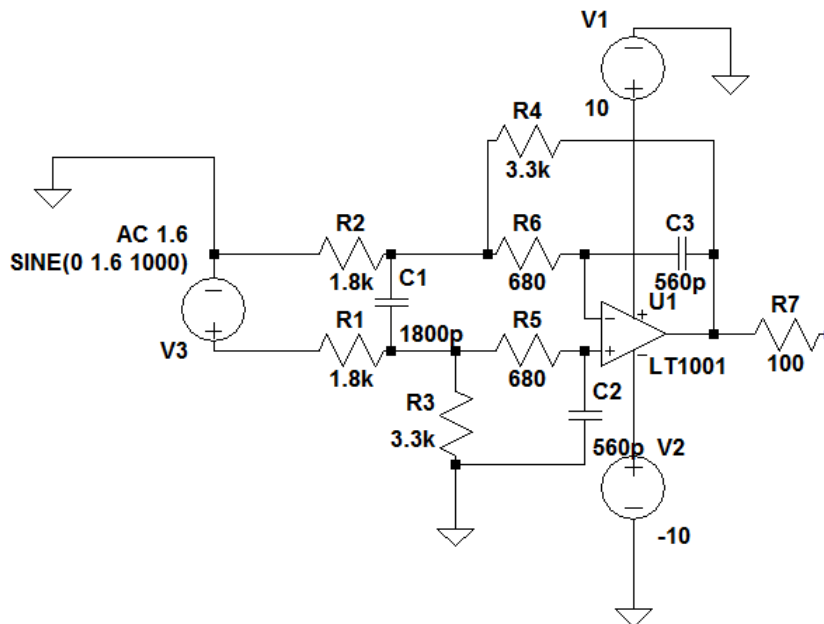
Kuvassa 40 on esitetty kokonaisharmonisen särön ja kohinan prosenttiosuus signaalista digitaalisen sisääntulotason funktiona.

### 3.5 Vahvistin

Differentiaalinen analoginen ääni DA-muuntimelta täytyy vielä alipäästösuodattaa ja vahvistaa operaatiovahvistinkytkennällä. Balansoitu vahvistinkytkentä summaa differentiaalisen signaalin epäsymmetriseksi jolloin signaali kulkee yhdessä johtimessa ja sen referenssitaso on laitteen maataso.

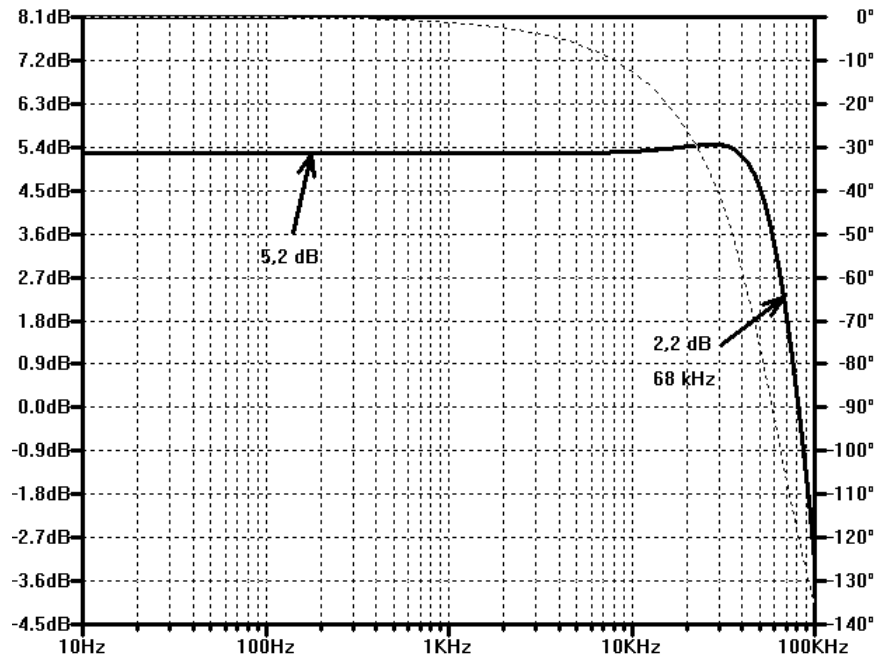
Työssä käytettiin Texas Instrumentsin valmistamaa audiokäyttöön tarkoitettua OPA2134 operaatiovahvistinta jossa on kaksi operaatiovahvistinta, kummallekin äänikanavalle, DIP8 paketissa. Piirilevyllä juotettiin DIP8 kanta jolloin operaatiovahvistinta voi tarvittaessa vaihtaa helposti.

Operaatiovahvistinkytkentänä käytettiin PCM1793 datalehden suosituskytettä PCM1793-piirin analogivahvistimelle. Kytettä simuloitiin LTspice IV-ohjelmalla kuvan 41 mukaisella kytkennällä.



Kuva 41. Operaatiovahvistinkytkentä, toinen kanava [9]

Simuloitu kytkennän taajuus- ja vaihevaste on esitetty kuvassa 42.



Kuva 42. Operaatiovahvistinkytken simuloitu taajuus- ja vaihevaste.

Vahvistimen päästökaistan vahvistus on 5,2 dB, eli noin 1,8-kertainen ja päästökaistan -3 dB piste on 68 kHz:n kohdalla. Tästä voidaan todeta, että alipäästösuodattimen tehtävä ei ole suodattaa äänitaajuuksia, vaan suuritaajuisia kohinaa, joka muodostuu DA-muuntimen delta-sigma-modulaattorissa. Vaihevaste on melko lineaarinen, 10 kHz:n taajuudella vaihe on kääntynyt n. 13 astetta, 20 kHz:n taajuudella n. 27 astetta.

Operaatiovahvistimen ulostuloihin lisättiin vielä 100  $\Omega$  vastukset, joka määrittää ulostuloimpedanssin. Vahvistimissa sisääntuloimpedanssi on suuri, tyypillisesti noin 10 k $\Omega$ , jolloin DA-muuntimen pieni, 100  $\Omega$  ulostuloimpedanssi saa aikaan sen, että iso osa jännitteestä jää suureen sisääntuloimpedanssiin ja siirrettävä teho on pieni.

### 3.6 Piirilevyjen valmistus

Piirilevyjen tekemiseen on useita erilaisia menetelmiä ja tässä työssä vaatimuksena on mahdollisimman tarkka jälki ja mahdollisuus levyjen tekemiseen ns. kotikonstein. Piirilevyistä irrotetaan ylimääräinen kupari yleensä syövyttämällä, mutta piirilevykuvion siirtämiseen levyille ennen syövytystä on useita eri tekniikoita. Piirilevykuva voidaan sulattaa piirilevyyn kiinni, piirilevykuva voidaan piirtää erityisellä tussilla levyyn tai piirilevy voidaan valottaa sopivan valotusmaskin läpi.

Tähän työhön tekniikaksi valikoitui valotus, joka tuntui ratkaisulta jolla päästään tarpeeksi tarkkaan jälkeen kohtuullisen helposti. Valotuksen perusideana on se, että piirilevyn päälle asetetaan piirilevyn kuva esimerkiksi kalvolle tulostettuna jonka jälkeen levyä valotetaan UV-valolla. Tällöin piirilevyssä oleva suojalakka reagoi UV-valon kanssa ja kuvio jää levyyn.

Piirilevyjen suunnitteluun käytettiin EAGLE 5-ohjelmistoa, joka on harrastus- ja opiskelijakäyttöön ilmainen. Ilmaisversiossa on muutamia rajoituksia ja sillä voi tehdä maksimissaan 10 cm \* 8 cm kokoisia kaksipuolisia piirilevyjä. Tässä työssä piirilevyjen maksimikoko riitti juuri ja juuri. Piirilevyt olivat yksipuolisia.

Piirilevyjen valmistus aloitettiin kuvioiden tulostamisella läpinäkyvälle kalvolle. Tulostimenä toimi tavallinen kotikäyttöön tarkoitettu mustesuihku monitoimitulostin. Tulostimen jälki ei ollut tarpeeksi tummaa, vaan kalvosta näki valoa vasten vielä läpi jolloin täytyi tulostaa kaksi kuvaa ja laittaa ne päällekkäin, näin valoa ei pääse vuotamaan kuvion läpi. Kuvat tulostettiin peilikuvana, jolloin kun ne laitetaan valotuksessa levyjen päälle oikeinpäin, tulee mustepuoli kiinni levyyn jolloin kalvon paksuudesta johtuen valoa ei pääse vuotamaan kuvion alle.

Valotusmenetelmää käytettäessä tulee piirilevyn olla lakattu uv-valoherkällä suojalakalla. Lakkauksen voi tehdä itse mutta tasaisen ja hyvän lakkapinnan saaminen on hankalaa. Levyjä myydään myös valmiiksi lakattuina joissa lakkausjälki on virheetön. Lakan koostumus on sellainen, että se reagoi vain ultraviolettivalon kanssa, joka helpottaa levyjen käsittelyä. Levyjä ei silti kannata jättää valoisaan paikkaan koska auringonvalon ja normaalien valaisimien spektri sisältää aina jonkin verran UV-valoa. Valmiiksi lakatuissa levyissä on valoa läpäisemätön suojakalvo lakkapinnan päällä.

Piirilevyt leikattiin rautasahalla mittoihinsa ja reunojen karhea sahausjälki viilattiin pois jotta kalvot saataisiin tiiviisti levyn pintaan. Piirilevystä revittiin suojakalvo pois ja kalvot asetettiin piirilevyn päälle. Kalvojen päälle laitettiin vielä lasilevy jotta alempi kalvo olisi tiiviisti kiinni levyssä ja ylempi kalvo tiiviisti alemmassa kalvossa. Tämän jälkeen kalvot kohdistettiin lasilevyä liikuttamalla ja UV-valo laitettiin päälle. Valotukseen käytettiin valaisinta jossa on Osramin Dulux-L Blue 18W/78 UV-loisteputki, joka emittoi valoa UVA-alueella eli 315 – 400 nm aallonpituudella.

Valaisimesta oli poistettu suojakupu jotta UV-valoa ei absorboituisi siihen ja valaisin oli n. 20 cm piirilevyn yläpuolella. Koska UV-valo absorboituu eri lailla eri materiaaleihin ja tässä niitä oli lasi ja kaksi kalvoa, valotusaika täytyi selvittää kokeilemalla. Muuttaman kokeilun jälkeen 14 minuutin valotusaika osoittautui toimivaksi. Valotuksen jälkeen piirilevyn pinnalta poistetaan valottunut suojalakka veden ja natriumhydroksidin eli lipeän seoksella. Seoksen vahvuudeksi riittää n. 1 % joten seos saadaan aikaa sekoittamalla veteen sopivalla suhteella Kodin Putkimiestä, joka sisältää 10 % lipeää. Valottunut lakka irtoaa lähes välittömästi levystä joten 30 sekunnin liotus on riittävä.

Kun valottuneista alueista on suojalakka poistettu ja esillä on pelkkä kupari, on levy valmiina syövytykseen. Syövytykseen käytetään ammoniumpersulfaattia, joka on valkoista jauhemaista ainetta ja se syövyttää metalleja. 100 grammaa ammoniumpersulfaattia liuotettiin 0,5 litraan lämmintä vettä. Levy upotettiin liuokseen ja se oli syöpynyt noin 10 minuutissa. Levyä liikuttelemalla syöpymisastiansa syöpyminen nopeutui hienan, myös seoksen lämpötila vaikuttaa syöpymiseen ja mitä lämpimämpää seos on, sitä nopeammin se syöpyy. Syövytysprosessissa tulee ottaa huomioon aineen syövyttävät ominaisuudet, joten kaikki astiat ja työvälineet tulee olla esimerkiksi muovisia.

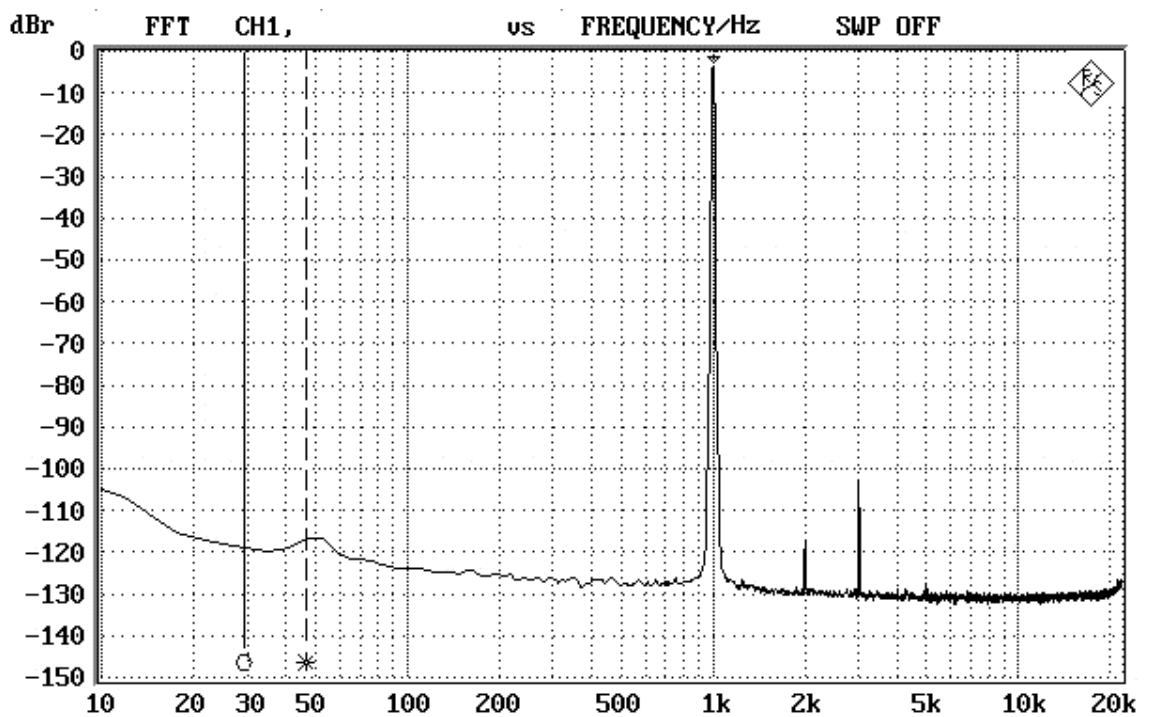
Viimeinen työvaihe levyjen tekemisessä on reikien poraaminen komponenteille ja valotumattoman suojalakan poisto kuparipinnan päältä esimerkiksi asetonilla. Lipeäliuoksen voi hävittää viemäriin, mutta ammoniumpersulfaatti ja siihen liuennut kupari on ongelmajätettä ja tulisi hävittää asianmukaisella tavalla.

## 4 MITTAUSTULOKSET

Kun laite oli saatu valmiiksi ja testattu toimivaksi, mitattiin siitä suorituskykyarvot. Laitteesta mitattiin harmoninen särö ja kohina, taajuusvaste sekä ylikuuluminen. Mittauksessa käytettiin Rohde&Schwartz UPL-äänianalysaattoria. Analysaattorilla syötettiin digitaalista signaalia optiseen sisääntuloon ja mitattiin analogista signaalia laitteen ulostulosta.

### 4.1 Harmoninen särö ja kohina

Komponenttien epälineaarisuudesta johtuen alkuperäisen signaalin perustaajuuden kerannaiset aiheuttavat signaaliin vääristymää, jota kutsutaan harmoniseksi säröksi. Harmonista säröä aiheutuu aina kun signaalia käsitellään, mutta sen määrä riippuu käytettävien komponenttien laadusta ja kytkennästä. Kuvassa 43 on esitetty FFT-spektri laitteen analogiulostulosta. Mittasignaalinä käytettiin 24-bittistä 1 kHz:n sinisignaalia jonka amplitudi oli puolet maksimiarvosta. Analogiulostulossa amplitudi oli 1,05 V<sub>RMS</sub>. As- teikon 0 dBr oli vastasi jännitearvoa 1.1 V<sub>RMS</sub>.



Kuva 43. FFT-spektrikuvaaja laitteen analogiulostulosta

Kuten kuvasta 43 nähdään, kohinataso 50 Hz:n jälkeen pysyy alle -120 dB tasolla. Kuvassa näkyy myös mittasignaalin 1. ja 2. harmoninen komponentti 2 kHz:n ja 3 kHz:n taajuudella. Myös 50 Hz:n taajuudella voidaan nähdä piikki, joka johtuu verkkotaajuudesta.

Määritetään laitteen kokonaisharmoninen särö ja kohina, eli THD+N-arvo. THD+N on harmonisten särökomponenttien ja kohinan summan ja hyötysignaalin amplitudin suhde joka ilmoitetaan usein prosentteina sekä desibeleinä. THD+N määritellään seuraavalla kaavalla:

$$\text{THD} + \text{N} = \frac{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_{\text{KOHINA}}^2}}{U_0}$$

$U_0$  on signaalin perustaajuus ja  $U_1, U_2, U_3$  jne. on perustaajuuden harmonisia särökomponentteja.  $U_{\text{KOHINA}}$  on pohjakohinan amplitudiarvo. Arvot kaavassa ovat jännitearvoja, joten kuvaajasta luettavat arvot täytyy muuttaa ensin asteikon mukaisiksi jännitearvoiksi. Laskussa  $U_1 = 1.$  harmoninen särökomponentti,  $U_2 = 2.$  harmoninen särökomponentti,  $U_3 = 50$  Hz kohdassa oleva piikki sekä  $U_4 = 10$  Hz kohdassa oleva piikki.  $U_{\text{KOHINA}}$  arvona käytetään kuvasta valittua -125 dB keskimääräistä pohjakohinatasoa.

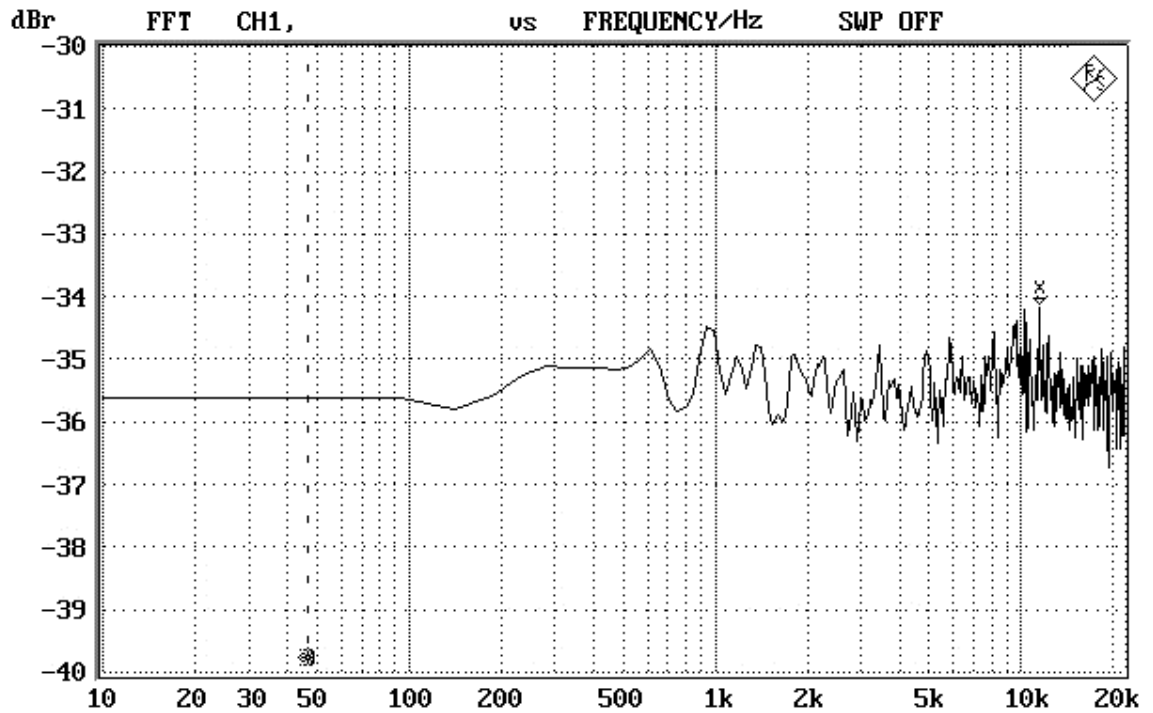
$$\frac{\sqrt{(1.57 \cdot 10^{-6})^2 + (1.11 \cdot 10^{-5})^2 + (1.98 \cdot 10^{-6})^2 + (1.11 \cdot 10^{-5})^2 + (7.87 \cdot 10^{-7})^2}}{1,4} \cdot 100$$

$$= 0,00113913 \%$$

THD+N on siis 0,0011 %. Desibeleinä suhde on -98,8 dB. Lasketut arvot ovat lähellä analysaattorin ilmoittamia arvoja, jotka olivat THD+N -97,1 dB (0,0014 %).

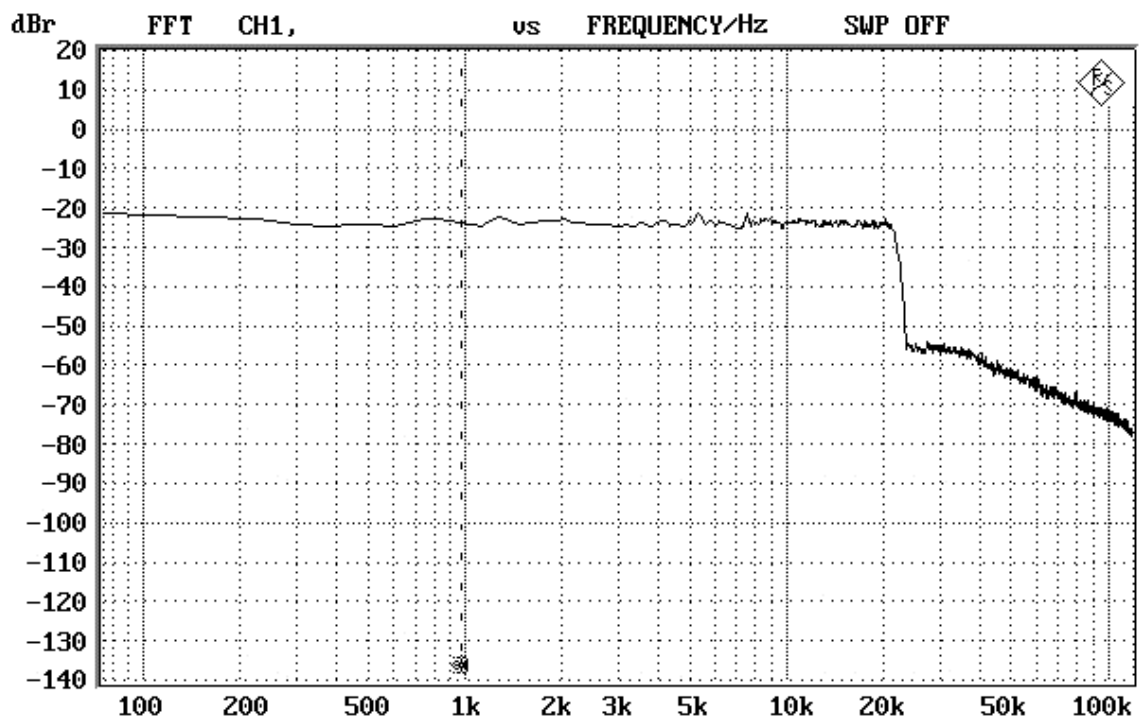
#### 4.2 Taajuusvaste

Taajuusvaste mitattiin syöttämällä 24 bittistä valkoista kohinaa optiseen sisääntuloon ja mittaamalla spektri ulostulosta. Kuvassa 44 on esitetty taajuusvaste välillä 10 Hz – 22 kHz.



Kuva 44. Laitteen taajuusvaste välillä 10 Hz – 22 kHz

Kuten kuvasta 44 nähdään, pysyy taajuusvaste pääsääntöisesti  $\pm 1$  dB:n rajoissa. Kuvassa 45 nähdään taajuusvaste välillä 10 Hz – 100 kHz.

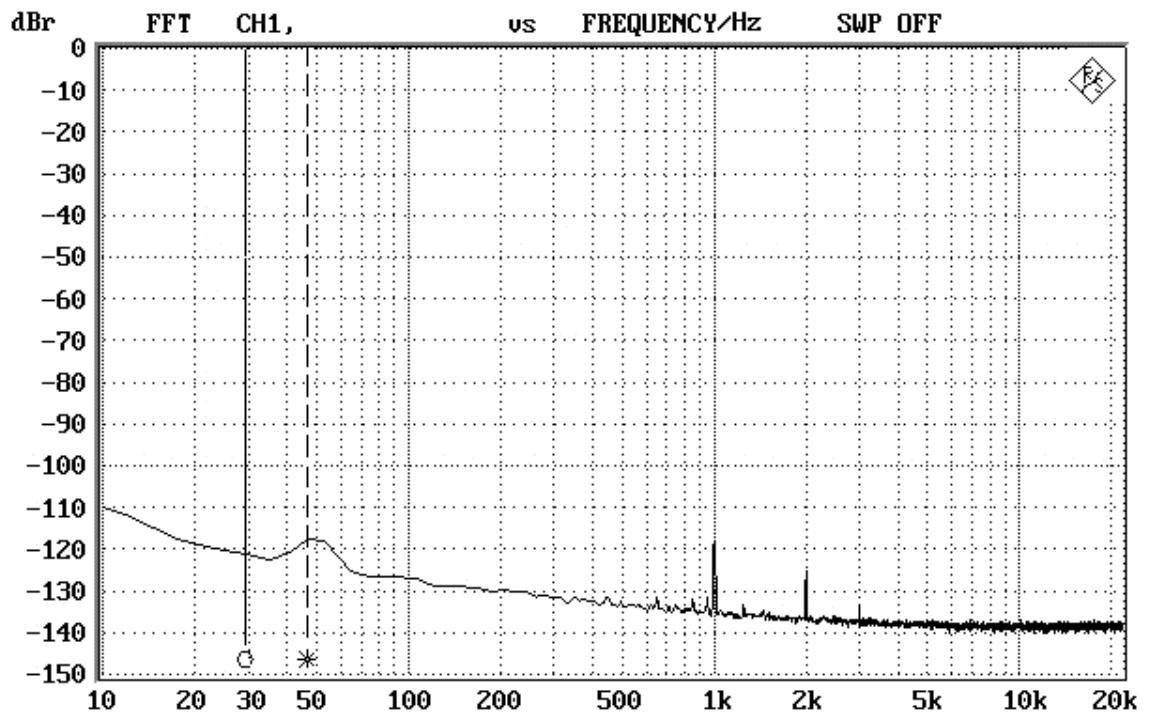


Kuva 45. Laitteen taajuusvaste välillä 10 Hz – 100 kHz

Taajuusvaste on melko suora 22 kHz:n asti, jonka jälkeen PCM1793-piirin alipäästösuodin suodattaa jyrkästi ylemmät taajuudet. 30 kHz:n jälkeen nähdään analogiosan loivempi alipäästösuodatin.

### 4.3 Ylikuuluminen

Kaksikanavaisessa äänentoistossa ylikuulumisella tarkoitetaan, paljonko vasemman kanavan ääntä vuotaa oikeaan kanavaan ja päinvastoin. Ylikuuluminen mitataan siten, että syötetään vasempaan äänikanavaan digitaalista 24 bitin 1 kHz:n sinisignaalia 0 dBr amplitudilla ja mitataan toisen kanavan spektri. Kuvaaja on esitetty kuvassa 46.



Kuva 46. Ylikuuluminen oikeaan kanavaan

1 kHz:n kohdalla on piikki joka on siis vasemman kanavan signaalista johtuva. Piikin amplitudi on -119 dB, jolloin laitteen ylikuulumisvaimennus on -119 dB.

## 5 YHTEENVETO

Työssä tutkittiin digitaalisen äänen teoriaa ja siirtoprotokollia sekä sovellettiin tätä tietoa käytäntöön suunnittelemalla laite, joka muuntaa digitaalisen äänisignaalin analogiseksi linjatasoiseksi äänisignaalksi. Projekti onnistui odotusten mukaisesti ja alussa asetetut tavoitteet saavutettiin.

Alun perin suunnitelma oli tehdä laitteen eri osat omille piirilevyilleen jolloin testaaminen ja mahdolliset korjaukset olisivat olleet helppo toteuttaa. Näin ei kuitenkaan ollut, vaan käytännön testausprosessi osoitti että suuri johtojen määrä piirilevyjen välillä hankaloitti kokoamista ja testaamista eikä laitetta saatu tällä tavoin toimimaan. Lopulta laite suunniteltiin uudelleen yhdelle piirilevyille jolloin se toimi USB-vastaanotinta lukuun ottamatta.

USB-vastaanottimen toimimattomuus viimeisimmässä versiossa jäi arvoitukseksi tämän työn aikarajojen puitteissa. Täysin sama kytkentä toimii kuitenkin erillisellä piirilevyllä, joten mahdollisia selityksiä toimimattomuudelle on kaksi. Joko PCM2704-piiri on vaurioitunut juotosvaiheessa tai, kuten liitteen 2 piirilevykuvasta nähdään, laitteen maalevy ja USB:n maajohdin on niin lähellä toisiaan että niiden välille muodostuu kapasitanssia, joka vaikuttaa kideoskillaattorin toimintaan eikä piiri tällöin käynnisty oikein. Erillinen USB-vastaanotin kuitenkin toimii, joten sitä pystytään käyttämään tässä työssä, jolloin laitteen funktionaalisuus säilyy alun perin suunnitellun kaltaisena.

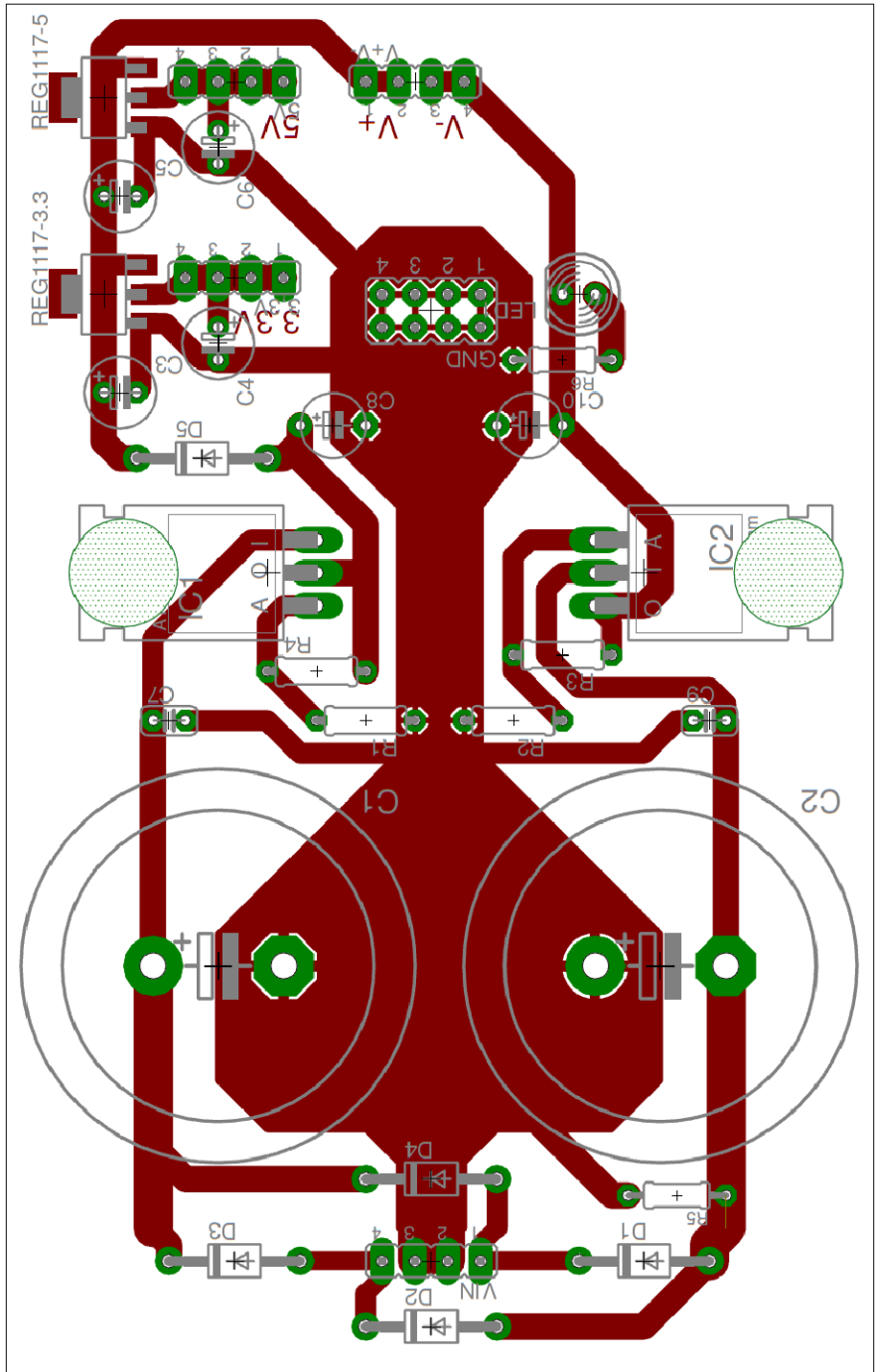
Lopulta kuitenkin saatiin suunniteltua toimiva ja kohtuullisen hyvät suorituskykyarvot omaava DA-muuntimen konsepti joka pärjää vertailussa kaupallisille laitteille. Tämä työ on hyvä pohja lähteä parantelemaan ja kehittämään DA-muunninta suorituskykyarvoiltaan ja toiminnallisuudeltaan vielä paremmaksi.

## LÄHTEET

1. ACPL-W70L datalehti. 2010 [viitattu 5.4.2011]  
[http://download.siliconexpert.com/pdfs/2010/4/12/6/56/7/789/avago\\_/manual/av02-1267en.pdf](http://download.siliconexpert.com/pdfs/2010/4/12/6/56/7/789/avago_/manual/av02-1267en.pdf)
2. SPECIFICATION OF THE DIGITAL AUDIO INTERFACE (The AES/EBU interface). 2004 [viitattu 30.3.2011]  
<http://tech.ebu.ch/docs/tech/tech3250.pdf>
3. DIR9001 datalehti. 2006 [viitattu 10.3.2011]  
<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/dir9001.pdf>
4. Eronen, Mauri 2011. Jitterin anatomia. Hifimaailma (1/2011), 16-17
5. I<sup>2</sup>S bus specification. 1986 [viitattu 30.3.2011]  
[http://www.nxp.com/acrobat\\_download2/various/I2SBUS.pdf](http://www.nxp.com/acrobat_download2/various/I2SBUS.pdf)
6. Introduction to Computer Music, 6. Quantizing, approximation errors and sample size. 2010 [viitattu 6.4.2011]  
[http://www.indiana.edu/~emusic/etext/digital\\_audio/chapter5\\_quantize.shtml](http://www.indiana.edu/~emusic/etext/digital_audio/chapter5_quantize.shtml)
7. Jitter. 2007 [viitattu 30.4.2011]  
<http://www.digido.com/jitter.html>
8. LM317 datalehti. 2011 [viitattu 15.3.2011]  
<http://www.national.com/profile/snip.cgi/openDS=LM317>
9. PCM1793 datalehti. 2004 [viitattu 10.3.2011]  
<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/pcm1793.pdf>
10. PCM2704 datalehti. 2009 [viitattu 10.3.2011]  
<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/pcm2704.pdf>
11. REG1117 datalehti. 2004 [viitattu 20.3.2011]  
<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/reg1117.pdf>

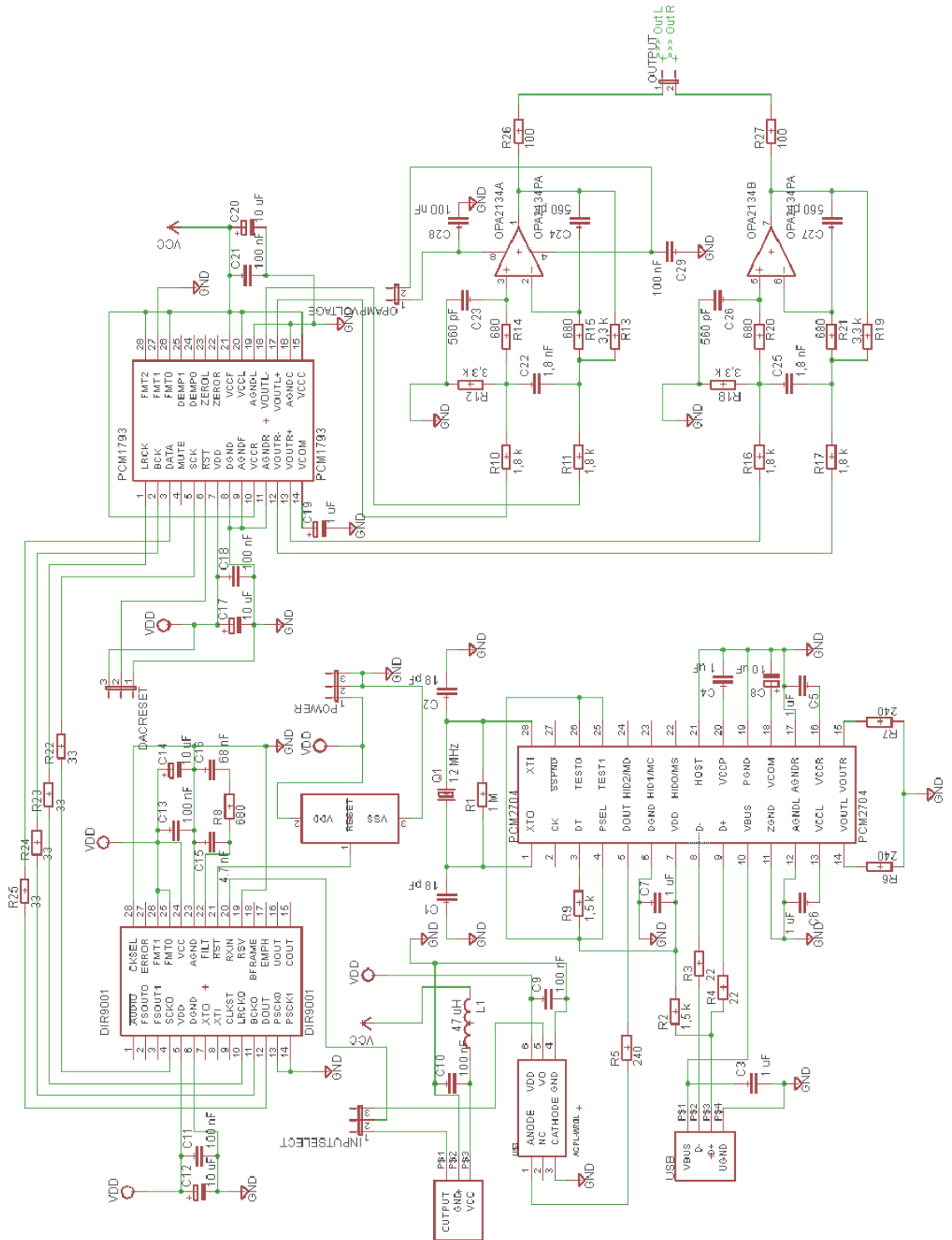
12. S/PDIF Interface. 2009 [viitattu 7.4.2001]  
<http://www.epanorama.net/documents/audio/spdif.html>
13. TORX177 datalehti. 2006 [viitattu 20.3.2011]  
<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/212143/TOSHIBA/TORX177.html>
14. Universal Serial Bus Revision 2.0 specification. 2000 [viitattu 16.3.2011]  
[http://www.usb.org/developers/docs/usb\\_20\\_021411.zip](http://www.usb.org/developers/docs/usb_20_021411.zip)
15. What is dither? Earlevel engineering. 1996 [viitattu 28.3.2001]  
<http://www.earlevel.com/main/1996/10/20/what-is-dither/>

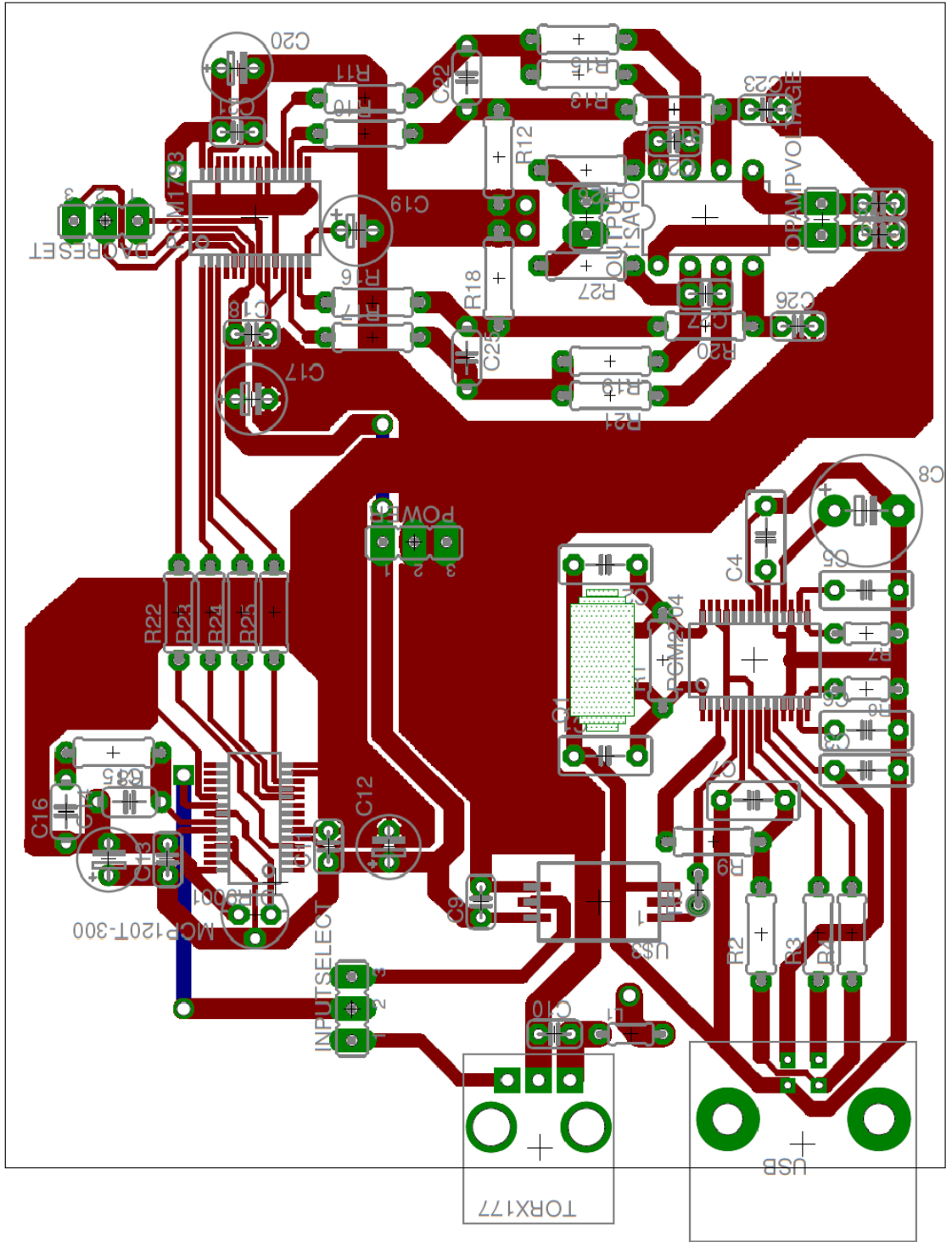




DA-MUUNTIMEN KYTKENTÄKAAVIO SEKÄ  
PIIRILEVYKUVA

LIITE 2: 1 (2)





## DA-MUUNTIMEN OSALUETTELO

## LIITE 3

Osa	Tyyppi	Arvo	Määrä
R3, R4	Vastus	22 $\Omega$	2
R22, R23, R24, R25	Vastus	33 $\Omega$	4
R26, R27	Vastus	100 $\Omega$	2
R5, R6, R7	Vastus	240 $\Omega$	3
R8	Vastus	680 $\Omega$	1
R2, R9	Vastus	1,5 k $\Omega$	2
R1	Vastus	1 M $\Omega$	1
R14, R15, R20, R21	Vastus - toleranssi 1%	680 $\Omega$	4
R10, R11, R16, R17	Vastus - toleranssi 1%	1,8 k $\Omega$	4
R12, R13, R18, R19	Vastus - toleranssi 1%	3,3 k $\Omega$	4

C1, C2	Kondensaattori - keraaminen	18 pF	2
C23, C24, C26, C27	Kondensaattori - keraaminen	560 pF	4
C22, C25	Kondensaattori - keraaminen	1,8 nF	2
C15	Kondensaattori - keraaminen	4,7 nF	1
C16	Kondensaattori - keraaminen	68 nF	1
C9, C10, C11, C13, C18, C21, C28, C29	Kondensaattori - keraaminen	100 nF	8
C3, C4, C5, C6, C7	Kondensaattori - keraaminen	1 $\mu$ F	5
C19	Kondensaattori - elektrolyytti	1 $\mu$ F	1
C8, C12, C14, C17, C20	Kondensaattori - elektrolyytti	10 $\mu$ F	5

L1	Kela	47 $\mu$ H	1
Q1	Kideoskillaattori	12 MHz	1

Osa	Tyyppi	Paketointi	Määrä
Avago Technologies ACPL-W70L	Optoerotin	SSOIC-6	1
Microchip MCP120T-300DI	Reset-piiri	TO-92	1
Texas Instruments OPA2134	Operaatiovahvistin	DIP8	1
Texas Instruments DIR9001	S/PDIF dekooderi	SSOP28	1
Texas Instruments PCM1793	DA-muunnin	SSOP28	1
Texas Instruments PCM2704	USB-äänirajapinta	SSOP28	1
FCI USB 61729	USB-liitin B naaras		1
Toshiba TORX177	TOSLINK-vastaanotin		1

## TEHOLÄHTEEN OSALUETTELO

## LIITE 4

Osa	Tyyppi	Arvo	Määrä
R3, R4	Vastus	240 $\Omega$	2
R6	Vastus, arvo riippuu ledistä	340 $\Omega$	1
R5	Vastus	680 $\Omega$	1
R1, R2	Vastus	1,8 k $\Omega$	2

C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9, C10	Kondensaattori	100 $\mu$ F	2
C1, C2	Kondensaattori	10 000 $\mu$ F	2

Osa	Tyyppi	Paketointi	Määrä
Vishay 11DQ06TR	Schottky diodi	DO-204AL	5
Texas Instruments REG1117-3	Regulaattori 3,3 V	SOT-223	1
Texas Instruments REG1117-5	Regulaattori 5 V	SOT-223	1
National Semiconductor LM317	Säädettävä regulaattori	TO-220	1
National Semiconductor LM337	Säädettävä regulaattori	TO-220	1
Ledi			1