



Markus Mattila

Digitaalisten ääniprotokollien vertailtavat ominaisuudet

Signaalin jakaminen ja viive

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Medianomi

Esitys- ja teatteritekniikan tutkinto-ohjelma

Opinnäytetyö

10.11.2023

Tiivistelmä

Tekijä(t):	Mattila Markus
Otsikko:	Digitaalisten ääniprotokollien vertailtavat ominaisuudet
Sivumäärä:	36 sivua
Aika:	10.11.2023
Tutkinto:	Medianomi
Tutkinto-ohjelma:	Esitys- ja teatteritekniikka
Ohjaaja(t):	Lehtori Timo Hiekkänen

Tämä opinnäyte käsittelee esitystekniikassa äänimiksereissä käytettävien digitaalisten ääniprotokollien vertailtavia ominaisuuksia. Tarkoituksena on syventyä ominaisuuksista viiveeseen ja signaalin jakeluun. Opinnäytteestä voi olla hyötyä lukijalle, joka on esimerkiksi valitsemassa omaan käyttöön sopivaa protokollaa tai haluaa mitata oman järjestelmänsä viiveen. Opinnäyte ei suoraan esittele useita protokollia ja niiden ominaisuuksia, vaan keskittyy esittelemään ominaisuuksia, joita näiden välillä olisi järkevää vertailla.

Opinnäytteen teoriaosan aluksi käydään läpi digitaalisen signaalin ja sen siirron sekä tietoverkon perusteita. Seuraavaksi käsitellään digitaalisen äänen ominaisuuksia ja AD-muunnosta, ja käydään läpi, mitä digitaaliset ääniprotokollat ovat ja mihin niitä käytetään esitystekniikassa. Luvussa viisi käsitellään myös tarkemmin vertailtavia ominaisuuksia viivettä ja signaalin jakelujärjestelmiä sekä digitaalisten ääniprotokollien jakamista eri OSI-mallin mukaisille kerroksille.

Luvussa kuusi tehdään käytännön testi viiveen mittaamiseksi kahden eri protokollan välillä. Tuloksia pohditaan vertailemalla niitä tutkimukseen viiveen merkityksestä äänen monitorointiin. Kahden valitun protokollan välillä vertaillaan myös niiden signaalin jakelujärjestelmiä esimerkkijärjestelmien pohjalta. Teoriataustan ja käytännön testien perusteella selviää miten eri tekniikoilla toteutettu digitaalisen signaalin siirto vaikuttaa digitaalisen äänen viiveeseen sekä kuinka eri tekniikat vaikuttavat signaalin jakelujärjestelmiin ja niiden joustavuuteen.

Avainsanat: digitaaliset ääniprotokollat, viive, signaalin jakelu, digitaalinen ääni

Abstract

Author(s): Markus Mattila
Title: Comparative Characteristics of Digital Audio Protocols
Number of Pages: 36 pages
Date: 10 November 2023

Degree: Bachelor of Culture and Arts
Degree Programme: Live Performance Engineering
Instructor(s): Timo Hiekkänen, Senior lecturer

This thesis studies the comparative features of digital audio protocols used in sound mixers in presentation technology. The focus is on exploring characteristics from latency to signal distribution. The thesis may be beneficial for readers who are, for instance, selecting a protocol for their own use or want to assess the latency of their system. Rather than directly presenting multiple protocols and their features, the thesis concentrates on introducing the features that would make sense to compare among them.

In the theoretical part of the thesis, the fundamentals of digital signal and its transmission, as well as basics of computer networks, are covered. Subsequently, the characteristics of digital audio and AD conversion are discussed, along with an overview of what digital audio protocols are and how they are used in presentation technology. In addition, a more in-depth exploration is conducted into the comparable features of latency and signal distribution systems, as well as the allocation of protocols to different layers of the OSI model.

As part of this thesis, a practical test was conducted to measure latency between two different protocols. The results were analyzed by comparing them to research on the significance of latency in audio monitoring. The signal distribution systems of the two selected protocols were also compared based on example systems. Based on the theoretical background and practical tests, the thesis reveals how the transmission of digital signals using different techniques affects the latency of digital audio and how various techniques impact signal distribution systems and their flexibility.

Keywords: digital audio protocols, latency, signal distribution, digital audio

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Digitaalinen signaali ja sen siirto	2
2.1	Digitaalisen signaalin laatuun vaikuttavat tekijät	2
2.2	Digitaalinen tiedonsiirtonopeus	3
2.3	Multipleksaus sekä simpleksit ja dupleksit järjestelmät	4
2.4	Point-to-point-tiedonsiirto	4
3	Tietoverkon perusteet	5
3.1	Tietoverkko	5
3.2	Pakettivälitteinen tiedonsiirto	6
3.3	Ethernet-lähiverkko	6
3.4	OSI-malli	7
3.4.1	Fyysinen kerros	7
3.4.2	Siirtoyhteyserros	8
3.4.3	Verkkokerros	8
3.5	TCP/IP-malli	8
4	Digitaalinen ääni ja AD-muunnos	9
4.1	Digitaalinen ääni	9
4.2	Näytteistys	10
4.3	Näytteenottotaajuus	10
4.4	Kvantisointi ja datan muuttaminen binäärimuotoon	12
4.5	Digitaalisen audion rakenne	12
4.6	Sanakello	13
5	Digitaaliset ääni-protokollat ja niiden ominaisuudet	14
5.1	Digitaalisten ääni-protokollien käyttö esitystekniikassa	14
5.2	Digitaalisten ääni-protokollien vertailtavat ominaisuudet	15
5.2.1	Viive	15
5.2.2	Signaalin jaeltavuus	16
5.2.3	Muut vertailtavat ominaisuudet	17
5.3	Fyysisen kerroksen ja OSI-mallin ulkopuoliset menetelmät	18
5.4	Siirtoyhteyserroksen ja verkkokerroksen ratkaisut	18
6	Käytännön vertailu eri protokollien välillä	19

6.1	Vertailtavien protokollien valinta	19
6.1.1	MADI	19
6.1.2	Dante	21
6.2	Koejärjestelmä	21
6.3	Viiveen vertailu ja mittaustulokset	24
6.3.1	Viiveen vertailu	24
6.3.2	Mittaustulokset	25
6.3.3	Järjestelmän kokonaisviive ja siirtotavan merkitys siihen	27
6.4	Signaalin jakelujärjestelmät	28
6.5	Muita mitattavia ominaisuuksia	31
7	Johtopäätökset	32
	Lähteet	34

1 Johdanto

Esitystekniikassa käytettävän äänen siirtoon käytetään nykyään yhä enemmän digitaalisia menetelmiä, etenkin pitkillä tiedonsiirtomatkoilla. Erilaisia digitaalisia äänen siirtoprotokollia onkin käytössä useita. Tässä opinnäytetyössä käydään läpi, mitä mahdollisia vertailtavia ominaisuuksia eri digitaalisten ääniprotokollien välillä on niitä käyttävien äänimiksereiden osalta. Vertailtavissa ominaisuuksissa on tarkoituksena keskittyä lähinnä käytännön työskentelyssä merkitseviin eroihin. Opinnäytetyön tavoitteena on saada tietoa, miten eri teknologiat vaikuttavat äänen siirtoprotokollien viiveisiin ja signaalin jaeltavuuteen sekä vaikuttavatko mahdolliset erot käytännön työskentelyssä. Viiveen merkittävyyttä pohditaan äänen monitoroinnin näkökulmasta ja signaalin jakelua esimerkiksi järjestelmien laajennettavuuden kannalta. Opinnäytetyön alkupuolella käydään läpi teoriapohjaa digitaalisesta äänisignaalista ja digitaalisesta tiedonsiirrosta sekä tietoverkon perusteista. Opinnäytteen keskivaiheella tehdään katsaus tänä päivänä yleisesti käytössä oleviin digitaalisiin ääniprotokolleihin ja selvitetään, miten eri protokollat eroavat eri OSI-mallin kerroksilla.

Tutkimusosaa varten valitaan kaksi protokollaan käytännön vertailuun. Käytännön vertailu suoritetaan tietoverkkopohjaisen ja point-to-point-pohjaisen protokollan välillä sekä pohditaan, mitä hyötyjä tietoverkkopohjaisessa ratkaisussa on verrattuna point-to-point-ratkaisuun. Kokeellisessa osiossa käydään läpi, kuinka digitaalisesta äänijärjestelmästä voidaan mitata sen aiheuttama viive ja kuinka viive eroaa kahden eri käytössä olevan digitaalisen äänen siirtoprotokollan välillä. Kokeellisessa osiossa käydään läpi, miten käytetyt tekniikat äänen siirtoprotokollien välillä vaikuttavat niiden ominaisuuksiin viiveen ja jaeltavuuden osalta.

2 Digitaalinen signaali ja sen siirto

2.1 Digitaalisen signaalin laatuun vaikuttavat tekijät

Digitaalinen signaali edustaa binaarilukujonoa, mitä digitaalinen audiokin on. Siinä on sallittua vain kaksi signaalitasoa. Näistä toinen edustaa nollaa ja toinen ykköstä. Esimerkkinä digitaalista signaalia siirrettäessä johdinparissa voi nollaa edustaa 0 voltin jännite ja ykköstä 5 voltin jännite. (Rayming i.a.)

Ideaalimaailmassa digitaalista signaalia siirrettäessä olisi jännitteen vaihtelu välitöntä, mutta se ei sitä todellisuudessa ole. Aikaa, joka signaalin tasolla kestää nousta 10 prosentista 90 prosenttiin, nimitetään nousuajaksi (engl. rise time). Vastaavasti signaalitason laskua 90 prosentista 10 prosenttiin nimitetään laskuajaksi (engl. fall time). (National instruments 2015; Techniques Smillie 1999, 3.) Nousu- ja laskuaikoja on havainnollistettu kuvassa yksi.

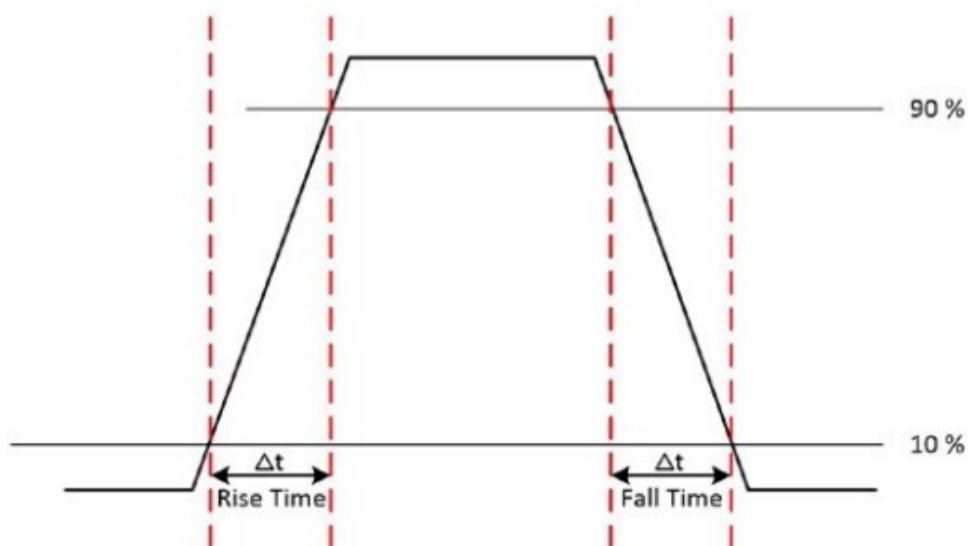
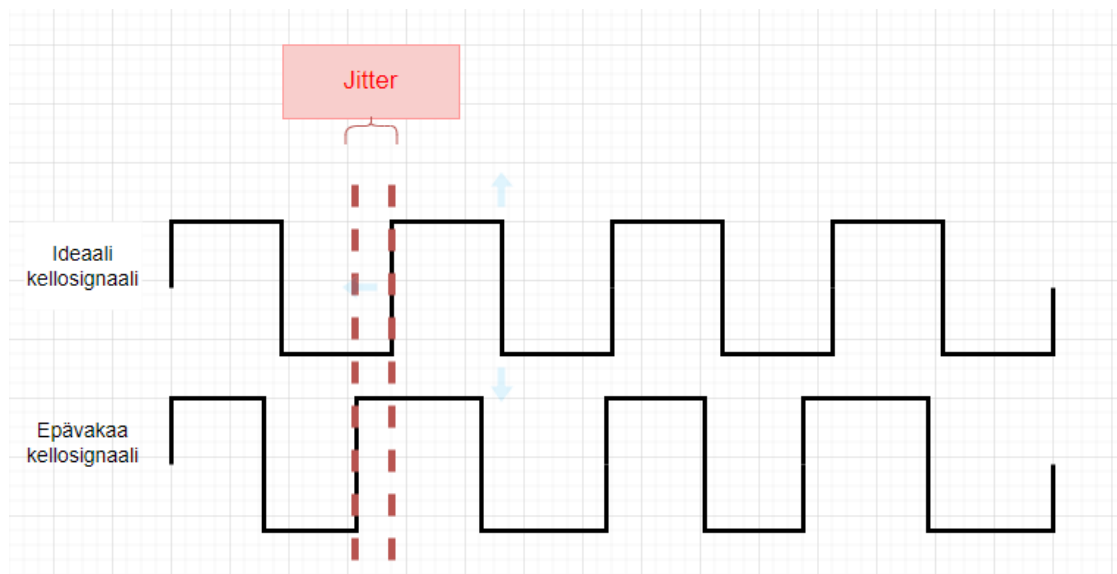


Figure 7. Rise time and fall time indicate the length of time a signal takes to change voltage between the low level and high level.

Kuva 1 Digitaalisen signaalin nousu- ja laskuaika. (National Instruments)

Toinen digitaalisen signaalin laatuun vaikuttava asia on todellisen lukuajan ero ideaaliin aikaan. Tästä käytetään nimitystä jitter. Jitteriä voi aiheuttaa esimerkiksi lähettävän tai vastaanottavan laitteen epätarkka kello. Tällöin lähettävän laitteen lähetystahti voi vaihdella tai signaalia vastaanottava laite voi lukea tietoa hieman väärinä aikoina. Pahimmillaan jitter yhdistettynä pitkiin nousu- ja laskeaikoihin voi aiheuttaa bittien väärin tulkitsemista. Ennen tätä bittien väärin tulkintaa ei äänenlaadullisia eroja ole kuitenkaan havaittavissa. (National instruments 2015; Maunula 2011.) Jitteriä on havainnollistettu kuvassa kaksi.



Kuva 2 Jitter: lähettävän ja vastaanottavan kellot eivät ole samassa tahdissa, jolloin digitaaliseen signaaliin syntyy virhettä.

2.2 Digitaalinen tiedonsiirtonopeus

Tiedonsiirtonopeudella kuvataan, millä nopeudella tieto siirretään digitaalisessa tiedonsiirtoväylässä. Tiedonsiirtonopeuden yksikkönä käytetään bittejä sekunnissa eli bit/s. Maksimi tiedonsiirtomäärää yhdessä tiedonsiirtoväylässä kuvaa kaistanleveys (engl. bandwidth). Kaistanleveyttä mitataan bitteinä per sekunti. (Huntington 2021, 121.)

2.3 Multipleksaus sekä simpleksit ja dupleksit järjestelmät

Multipleksauksen avulla saadaan yhteen tiedonsiirtoväylään mahdutettua enemmän tietoliikennekanavia tai datalähteitä. Kaksi yleisesti käytössä olevaa multipleksaustapaa on taajuutta jakava frequency-division multiplexing ja aikaa jakava time division multiplexing. (Huntington 2021, 122–124.)

Aikaa jakavassa multipleksauksessa monta tietoliikennekanavaa jaetaan paloiksi ja niitä lähetetään peräkkäin yhdessä tiedonsiirtoväylässä. Vastaanottavassa päässä multipleksattu signaali hajotetaan erillisiksi tietoliikennekanaviksi. Eli jokainen tietoliikennekanava käyttää yhtä tiedonsiirtoväylää vuorotellen. (Huntington 2021, 122–124.)

Taajuutta jakavassa multipleksauksessa monta tietoliikennekanavaa, joita moduloidaan eri taajuuksilla, lähetetään samaa tietoliikenneväylää pitkin. Tästä esimerkkinä on analoginen televisio, jossa samassa kaapelissa kulkee monta eri tv-kanavaa. (Huntington 2021, 122–124.)

Tietoliikenneväylä voidaan suunnitella toimimaan yhdessä tai useammassa tiilassa. Simpleksissä (engl. simplex) järjestelmässä tiedonsiirto on yhdensuuntaista, jolloin lähettäjä voi vain lähettää ja vastaanottaja vastaanottaa tietoa. Vuorosuuntaisessa järjestelmässä (engl. half duplex) voidaan tietoa siirtää molempiin suuntiin, mutta vain yhteen suuntaan kerrallaan. Kaksisuuntaisessa (engl. duplex) järjestelmässä voidaan tietoa siirtää molempiin suuntiin yhtä aikaa. (Huntington 2021, 122–124.)

2.4 Point-to-point-tiedonsiirto

Point-to-point-tiedonsiirrossa kaksi tai muutama järjestelmä on kytketty suoraan toisiinsa laitteesta laitteeseen. Tämä eroaa tietoverkosta, jossa voi olla kahdesta lähes äärettömään määrään laitteita kytkettyinä toisiinsa. (Huntington 2021, 139.)

Rinnakkaismuotoinen tiedonsiirto on yksinkertaisin tapa yhdistää kaksi digitaalista laitetta. Tässä kaksi laitetta yhdistetään useammalla johtimella ja niissä voidaan siirtää kaksi tai useampi bitti samanaikaisesti. Rinnakkaismuotoinen tiedonsiirto on nopeaa ja tehokasta, mutta se voi olla kallista pidemmillä matkoilla, koska se vaatii useita johtimia. Nykyään rinnakkaismuotoista tiedonsiirtoa käytetään harvoin edes lyhyillä matkoilla. Rinnakkaismuotoisessa tiedonsiirrossa tarvitaan yksi johdin (engl. stobe line) kertomaan se hetki, milloin lähetävä laite on valmis siihen, että sen tieto luetaan. (Huntington 2021, 139–140; Rouse 2018.)

Sarjaliikenteessä bittejä ei lähetetä rinnakkain, vaan ne lähetetään peräkkäin yhdessä johtimessa. Sarjaliikenteessä ei välttämättä tarvita erillistä kellosignaalia, mutta se on yksinkertaisempi tapa tahdistaa signaali. Tämä kuitenkin poistaa sarjaliikenteen hyödyn yhdessä johtimessa lähettämisestä. Järjestelmä voi olla synkroninen myös ilman erillistä kellosignaalia, jos lähetävä ja vastaanotettava laite seuraavat tiettyä kaavaa. Tällöin vastaanottava laite voi tahdistaa sisäisen kellonsa vastaanotettavasta tietojanasta. Sarjaliikenne voi olla myös asynkronista. Tällöin vastaanottaja tahdistuu uudelleen jokaisen digitaalisen sanan alussa. (Huntington 2021, 140.)

3 Tietoverkon perusteet

3.1 Tietoverkko

Monet esitystekniikassa käytettävät äänen siirtoprotokollat käyttävät tiedonsiirrossa Ethernet-verkkotekniikkaa. Tiedon siirtäminen tietoverkossa mahdollistaa esimerkiksi analogista signaalinjakelua monipuolisemman järjestelmän.

"Tietoverkko on yleisesti tiedonsiirtoon tarkoitettu looginen tai fyysinen verkko, joka yhdistää siihen kytketyt laitteet ja palvelut toisiinsa" (Jaakonhuhta 2003). Tietoverkot voivat olla laajuudeltaan erilaisia. Ne voidaan jakaa lähiverkkoon, jota kutsutaan LAN:ksi (local area network) tai laajaverkkoon, jota kutsutaan

WAN:iksi (wide area network). Yleisesti esitystekniikassa käytettävät tietoverkot ovat lähiverkkoja. (Huntington 2021, 153.)

3.2 Pakettivälitteinen tiedonsiirto

Toisin kuin point-to-point-tiedonsiirrossa tietoverkossa on vähintäänkin osa siirtoväylästä jaettua. Tämän takia tietoliikennettä pitää hallita jotenkin. Tavallinen tapa tähän on hajottaa tieto paketteihin (engl. packet). Näihin paketteihin lisätään otsikkodataa, jonka avulla se saadaan toimitettua oikeaan osoitteeseen tietoverkossa. Paketeista puhutaan yleensä verkkokerroksella. Kun paketti siirretään siirtoyhteyserroksella sekä siihen lisätään enemmän otsikkodataa ja synkronisointidataa, puhutaan kehyksestä (engl. frame). (Huntington 2021, 151.)

OSI-mallia käsitellään luvussa 3.4.

Tietoverkossa paketteja voidaan välittää eri tavoilla. Näistä kolme yleisintä tapaa on unicast, multicast ja broadcast. Unicast-lähetyksessä lähettäjän lähettämä paketti toimitetaan vain yhdelle vastaanottajalle. Multicast-lähetyksessä paketti toimitetaan kahdelle tai useammalle vastaanottajalle tietoverkossa. Tällöin lähettäjä lähettää tiedon vain yhden kerran, mutta se kopioidaan useammalle vastaanottajalle tietoverkossa. Broadcast-lähetyksessä yksi lähettäjä lähettää paketin ja se kopioidaan kaikille tietoverkossa oleville laitteille. Käyttämällä eri tiedon lähetystapoja voidaan verkon kapasiteetin käyttöä optimoida. (Huntington 2021, 152–153.)

3.3 Ethernet-lähiverkko

Ethernet on päästandardi esitysteknisissä sovelluksissa, joita myös digitaaliset äänen siirtoprotokollat ovat. Vaikka muitakin verkkostandardeja käytetään esimerkiksi WAN-sovelluksissa, ei niitä kohtaa esitysteknisissä sovelluksissa. Ethernetin avulla voidaan esimerkiksi siirtää monikanavaääntä ja laitteiden ohjaukseen käytettävää kontrollidataa. Ethernet on vastuussa vain bittien siirrosta paikasta toiseen, kun taas korkeamman tason protokollat esimerkkeinä TCP, IP

ja ARP ovat vastuussa viestin oikein välittämisestä luotettavasti ja oikein. (Huntington 2021, 154.)

Ethernet-tyyppinä on erilaisia, esimerkkeinä 10BASE-T, 100BASE-T eli Fast Ethernet ja 1000BASE-T eli Gigabit Ethernet. Nimensä mukaisesti 10BASE-T kykenee 10 Mbit/s siirtonopeuteen, 100BASE-T kykenee 100 Mbit/s siirtonopeuteen ja 1000BASE-T 1000 Mbit/s siirtonopeuteen. Ethernetin vahvuutena on sen kyky neuvotella maksimi siirtonopeudesta linkkien välillä. Tämän avulla 1000BASE-T rajapinnan omaavat laitteet kykenevät yhdistymään 100BASE-T-rajapinnan omaaviin tai jopa 10BASE-T-rajapinnan omaaviin laitteisiin. (Howell 2013, 158–159.)

3.4 OSI-malli

OSI-malli (Open Systems Interconnection Reference Model) on International Standardization Organizationin kehittämä seitsemän kerroksinen viitemalli, jonka puitteissa tietoliikennejärjestelmiä tulisi suunnitella. OSI-mallin mukaan ylempi kerros rakentuu alemman kerroksen tarjoamien palveluiden ylle. Tieto kulkee siis ylimmältä OSI-mallin kerrokselta läpi sen alla olevien kerrosten ja kulkeutuu vastaanottajalle mallissa alhaalta ylöspäin. (Huntington 2021 149–151; Kaurto 2018.)

OSI-mallin seitsemän kerrosta ylimmästä alimpaan ovat: sovelluskerros, esitystapakerros, istuntokerros, kuljetuskerros, verkkokerros, siirtoyhteyserros ja fyysinen kerros. Esitystekniikassa käytettävien digitaalisten äänen siirtoprotokollien ymmärtämisen kannalta OSI-mallin kolme alinta kerrosta ovat tärkeimmät. Fyysinen ja siirtoyhteyserros vastaavat luvussa 2 käsitellyä digitaalista tiedonsiirtoa, ja verkkokerros on jo tietoverkkopohjaista liikennettä.

3.4.1 Fyysinen kerros

Fyysinen kerros on OSI-mallin alin kerros. Se määrittää konkreettiset tarpeet tiedonsiirrolle, kuten kaapelit ja liittimet tai sen, mikä jännitetaso signaalissa tarkoittaa ykköstä ja mikä nolaa. Fyysisellä kerroksella ei ole älyä, mitä dataa siinä

siirretään, vaan sitä siirretään vain bitteinä. Fyysisen kerroksen standardeja ovat esimerkiksi Ethernet-liitäntä ja USB. (Huntington 2021, 151; Rouse 2023.)

3.4.2 Siirtoyhteyskerros

Siirtokerroksella fyysiseltä kerrokselta saatu raakadata paketoidaan sen siirtoa varten määrämittäisiin kehyksiin. Siirtokerrokseen sisältyy esimerkiksi virheen tunnistus ja mahdollisesti virheen korjaus, aloitus- ja lopetusbitit. Ethernet-protokollan mukaan siirtoyhteyskerroksessa olevat laitteet käyttävät tunnistautumiseen ja kommunikointiin MAC-osoitteita. MAC-osoitteet ovat jokaisen verkkoon kytkettävän laitteen uniikkeja osoitteita. Jokainen Ethernet-kehys sisältää sekä lähettävän että vastaanottavan laitteen MAC-osoitteen. Siirtoyhteyskerroksen protokollia on esimerkiksi ARP-protokolla. (Huntington 2021, 151–157; Rouse 2023.)

3.4.3 Verkkokerros

Verkkokerros vastaa verkon liikenteen ohjauksesta. Verkkokerroksella päätetään, kuinka tietyt viestit voidaan reitittää ja mihin ne lähetetään. Verkkokerroksella siis välitetään ylempien kerrosten datapaketteja tietokoneiden välillä. Ethernet-protokollan mukaan verkkokerroksella siirtoyhteyskerrokselta saatuun pakettiin lisätään tieto sen lähteestä ja määränpäästä IP-osoitteen muodossa. (Huntington 2021, 151–157; Rouse 2023.)

3.5 TCP/IP-malli

TCP/IP-malli on yksinkertaisempi versio OSI-mallista. Siinä yhdistetään OSI-mallin kolme ylintä kerrosta yhdeksi kerrokseksi, mikä tekee TCP/IP-mallista viisikerroksisen. Poikkeuksena OSI-malliin on TCP/IP-mallissa verkkokerros nimetty internet-kerrokseksi, kun OSI-mallissa, jossa sitä kutsutaan verkkokerrokseksi. (Howell 2013, 114.)

IP-protokolla eli Internet Protocol on kaikkien muiden protokollien perusta. Se vastaa IP-osoitteistuksesta ja varmistaa, että paketit ohjataan oikeisiin osoitteisiin. IP-protokolla ei välitä pakettien sisällöstä eikä suorita virheentarkistusta. Se ei myöskään huolehdi pakettien luotettavasta perille toimittamisesta tai niiden saapumisjärjestyksestä. Nämä tehtävät hoidetaan muilla protokollilla TCP/IP-mallissa. Nykyisin on käytössä neljäs versio eli IPV4. Tässä versiossa on käytössä 32-bittinen IP-osoitteistus. Tämän odotetaan tulevan rajoitteeksi tulevaisuudessa, ja siksi on kehitetty kuudes versio eli IPV6, jossa on käytössä 128-bittinen IP-osoitteistus. (Howell, 2013, 124.)

UDP eli User Datagram Protocol on suunniteltu suurten tietomäärien siirtämiseen mahdollisimman pienellä kaistaleveydellä. UDP käyttää tiedonsiirtoon IP-protokollaa. UDP-pakettien lähettäminen on mallia lähetä ja unohda. Lähettäjä ei saa vahvistusta paketin vastaanottamisesta. UDP:n käyttämä virheenkorjaus on minimaalista. Moni esitystekniikassa käytettävä Ethernet-protokolla perustuu UDP-protokollalle. (Howell 2013, 124.) Esimerkiksi Dante käyttää UDP-protokollaa audion jakeluun (Audinate i.a. a).

TCP eli Transmission Control Protocol luo virtuaalisen yhteyden kahden laitteen välille. Sen tehtävänä on tarkistaa, että IP-protokollan siittämät datapaketit toimitetaan onnistuneesti ja ovat virheettömiä ja oikeassa järjestyksessä. Jos paketti katoaa matkalla, TCP pyytää sen uudelleenlähetystä. TCP takaa datan luotettavan ja tarkan siirron. Käyttö vaatii aina virtuaaliyhteyden lähettävän ja vastaanottavan laitteen välillä. Siksi UDP on suosituampi esitystekniikassa. (Howell 2013, 125.) TCP- ja UDP-protokollat kuuluvat OSI-mallin kuljetuskerrokselle (GeeksforGeeks, 2023).

4 Digitaalinen ääni ja AD-muunnos

4.1 Digitaalinen ääni

Digitaalinen audiosignaali on binäärimuotoista dataa, jolla esitetään analogista aaltomuotoa (McCarthy 2013, 40). Yleisin digitaalisen audion esitysmuodoista

on LPCM-koodaus eli pulssikoodimodulaatio (linear pulse code modulation). Linearisessa pulssikoodimodulaatioissa audiosignaalin kvantisointiaskeleet ovat samansuuruisia. Linearisessa koodauksessa tallennetaan näytteen todellisia arvoja valitun erottelutarkkuuden mukaan. Ei-linearisissa koodaustavoissa voidaan tallentaa esimerkiksi edellisestä näytteestä seuraavaan tapahtuva muutoksen suuruus. Tätä kutsutaan deltamodulaatioksi. ADPCM-koodauksessa (engl. adaptive differential pulse code modulation) tallennetaan edellisten näytteiden avulla saadun ennustearvon ja todellisen arvon välinen erotus. (Laaksonen 2013, 66.)

Digitaalisen äänen hyötyjä ovat esimerkiksi sen muuttumattomuus esimerkiksi kopioitaessa tai siirrettäessä pitkiä etäisyyksiä. Muunnettaessa analoginen signaali digitaalseksi puhutaan AD-muunnoksesta ja muunnettaessa digitaalinen signaali analogiseksi puhutaan DA-muunnoksesta. (Laaksonen 2013, 66.)

4.2 Näytteistys

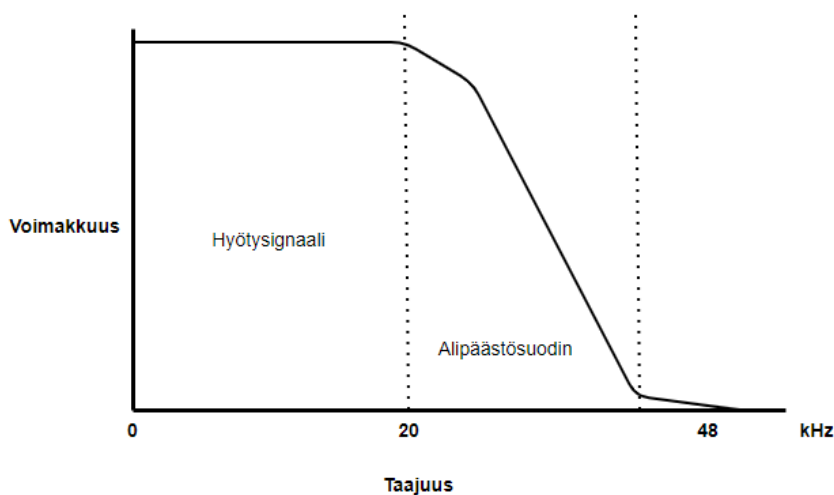
Näytteistys on digitaalisen audiosignaalin perusta. Kun analoginen audiosignaali muunnetaan digitaalseksi audiosignaalksi, otetaan analogisen audiosignaalin tasosta pistearvoja eli näytteitä tietyin tasaisin välein. Näiden näytteiden kokonaisuus esittää alkuperäistä yhtenäistä aaltoa. Näytteistyksessä oletetaan, että alkuperäisen signaalin taso ei ehdi muuttua näytteiden välissä merkittävästi. Näytteiden välisiä arvoja ei oteta siis huomioon. Tämän seurauksena alkuperäinen jatkuva signaali kvantisoituu eli muuttuu portaiseksi epäjatkuvaksi numeroarvojen jonoksi. Tämän takia näytteistetty digitaalinen audiosignaali ei vastaa täydellisesti alkuperäistä analogista signaalia. (Laaksonen 2013, 71.)

4.3 Näytteenottotaajuus

Nopeutta, jolla näytteitä otetaan, kutsutaan näytteenottotaajuudeksi (Laaksonen 2013, 66–67). Näytteenottotaajuus vaikuttaa myös siihen, kuinka korkeita taajuuksia pystytään kuvaamaan matemaattisesti. Nyquistin teorian mukaan näyt-

teenottotaajuuden tulisi olla aina kaksinkertainen verrattuna korkeimpaan analogisessa signaalissa esiintyvään taajuuteen. Muuten ylemmät taajuudet laskostuvat näytteistyksessä eli peilautuvat näytteenottotaajuuden puolikkaan suhteen alemmille taajuuksille. Esimerkiksi jos halutaan virheettömästi mallintaa 20 Hz - 20 kHz taajuusalue, pitää näytteenottotaajuuden olla vähintään 40 kHz. Jos näytteenottotaajuus ei ole vähintään kaksinkertainen korkeimpaan mallinnettavaan taajuuteen verrattuna, alkaa signaaliin muodostumaan särökomponentteja. Näitä yksittäisiä särökomponentteja nimitetään aliaksiksi. (Laaksonen 2013, 68.)

Laskostumista estetään käyttämällä alias-suodinta, joka on alipäästösuodin, jolla leikataan alkuperäisestä analogisignaalista kaikki hyötykaistan yläpuoliset taajuudet pois. Alias-suotimen käytön takia näytteenottotaajuuden on oltava korkeampi kuin teoreettinen Nyquistin taajuus, sillä sen täytyy toimia ylimpien kuuloalueen taajuuksien yläpuolella, ettei se vaikuta alkuperäisiin signaalin laatuun. Alias-suodin ei voi myöskään olla äärettömän jyrkkä. Tämä suodatus on myös AD-muunnoksen ensimmäinen vaihe. (Laaksonen 2013, 68–69.) Kuvalla kolme esitetään alipäästösuodinta, jolla estetään laskostumisen tapahtuminen.



Kuva 3 Alias-suodin.

4.4 Kvantisointi ja datan muuttaminen binäärimuotoon

PCM-muunnoksessa tason kvantisoinnissa mitattujen näytteiden arvot pyöristetään lähimpään digitaalisen asteikon lukuarvoon. Tasoasteikko riippuu valitusta digitointitarkkuudesta. Yleisimpiä käytössä olevia tarkkuuksia ovat esimerkiksi 16 bittiä tai 24 bittiä. Tästä tarkkuudesta voidaan käyttää myös termejä bittisyvyys tai näytteistysvyvyys. (Laaksonen 2013, 85.) Koska jokaisen alkuperäisen signaalin tason arvot on pyöristettävä lähimpään vakioarvoon, syntyy poikkeamaa alkuperäisen aaltomuodon ja kvantisoitujen näytearvojen välille. Tätä kutsutaan kvantisointivirheeksi. Kvantisointivirheen suuruus on korkeintaan puolet yksittäisestä kvantisointiaskeleesta. Tämä johtaa kvantisointisärön muodostumiseen, mutta se on sitä hiljaisempaa ja vähemmän häiritsevää, mitä suuremmalla tarkkuudella kvantisointi tehdään. (Laaksonen 2013, 71.)

Näytteistämisen ja kvantisoinnin seurauksena on alkuperäinen signaali muutettu sarjaksi numeroarvoja. Nämä arvot esitetään binäärilukuina, joita kaikki tietokoneet, siis myös digitaaliset äänimikserit käyttävät. (Laaksonen 2013, 71.)

4.5 Digitaalisen audion rakenne

Digitaalinen audio on binäärimuotoista dataa. Digitaalisessa audiossa yksi alkuperäisestä audiosta otettu näyte vastaa yhtä sanaa (engl. word). Sana koostuu yhdestä tai useammasta tavusta (engl. byte). Tavu koostuu kahdeksasta bitistä (engl. bit) eli yksittäisestä tietoalkiosta. Yksittäinen tietoalkio on siis joko 1 tai 0. (Laaksonen 2013, 72.)

Esimerkiksi 24-bittisen audiosignaalin yksi sana koostuu kolmesta kahdeksan bittisestä tavusta. Suurin 24-bittisellä binäärikoodilla ilmaistavissa oleva luku on 16 777 216. Kun näytteistysvyvydeksi valitaan 24 bittiä, on digitaaliseksi muunnettavan audion jännitteen ilmaisemiseen käytettävissä 16 777 216 eri tasoa.

Digitaalisen näytesanan jokainen bitti edustaa 6 dB dynamiikka-aluetta. Eli 24-bittisen audion dynamiikka-alueeksi saadaan 144 desibeliä. (Laaksonen 2013, 82.) Taulukossa yksi on esitelty eri bittisyvyyksillä käytössä oleva dynamiikka-alue.

Taulukko 1 Bittisyvyys ja dynamiikka-alue (Laaksonen 2013, 82.)

Bittisyvyys	Dynamiikka-alue
8	48 dB
16	96 dB
24	144 dB
32	192 dB

Esimerkistä voidaan tehdä huomio, että pidempi sanapituus kasvattaa dynamiikka-aluetta. Pidempi sanapituus kasvattaa myös tarvetta suuremmalle data-nopeudelle. Lineaarista PCM-koodausta laajemmän dynamiikka-alueen samalla sanapituudella mahdollistaa liukulukumuunnos (engl. floating point conversion). Tämä on yksi ei-lineaarista koodaustavoista. Liukulukumuunnoksessa digitaalinen sana jaetaan mantissaan eli näytearvon sisältävään osaan ja eksponenttiin, joka siirtää mantissan ilmoittamaa tasotietoa siten, että koodaus keskittyy ylös tai alas riippuen siitä, kuinka voimakas signaali on. Liukulukukoodattuna saadaan 19 bitillä ilmaista sama dynamiikka-alue, joka lineaarisella koodauksella vaatisi 23 bitin sanapituuden. (Laaksonen 2013, 90.)

4.6 Sanakello

Digitaalinen audio tarvitsee aina tahdistuksen toimiakseen. Jokainen näytearvo on mitattava tarkasti oikealla hetkellä, ja purettaessa takaisin analogiseksi signaaliksi se on tehtävä täysin samalla ajoituksella. Jokaisessa digitaalisessa laitteessa on oma sisäinen kello, joka tahdistaa näytteistämisen ja näytteiden purkamisen. (Laaksonen 2013, 74.)

Kytettäessä kaksi digitaalista laitetta yhteen, kuten mikseri ja digitaalinen lavarasia, on huolehdittava, että kumpikin laite tahdistuu samaan digitaaliseen kelloon. Aikapohjan tahdistuksen hoitavasta pulssijonosta käytetään nimitystä sanakello. Se voi sisältyä välitettävään signaaliin tai olla erikseen liitettävä ulkoinen kello. (Laaksonen 2013, 74.) Liitettäessä kaksi laitetta toisiinsa analogisesti tahdistuvat molemmat laitteet omiin sisäisiin kelloihinsa. Kun laitteilla ei ole yhteistä kellosignaalia, on järjestelmä asynkroninen, ja vastaavasti kun laitteilla on yhteinen kellosignaali, on järjestelmä synkroninen. Asynkronisessa signaalissa on etukäteen päätettävä bittien lukunopeudesta eli kellosta ja lähetyksen alkamisesta. Synkronisessa järjestelmässä lähetetään myös erillinen kellosignaali, jonka avulla vastaanottava laite tietää, milloin bitti luetaan. Tällöin vastaanottavassa laitteessa ei tarvitse päättää, milloin signaalia aletaan lukemaan tai milloin sen lukeminen lopetetaan. (Huntington 2021, 140–141.)

5 Digitaaliset ääniprotokollat ja niiden ominaisuudet

5.1 Digitaalisten ääniprotokollien käyttö esitystekniikassa

Nykyään käytössä olevia digitaalisia ääniprotokollia ovat esimerkiksi Audinaten kehittämä Dante, Multichannel Audio Digital Interface eli MADI, AES50, AES67, AVB ja Allen & Heathin kehittämä gigaACE. Kaikissa näissä protokollissa on mahdollista siirtää esimerkiksi kontrollidataa pelkän äänidatan lisäksi. Protokollat voidaan jaotella esimerkiksi OSI-mallin mukaisille kerroksille ja ei-tietoverkko-pohjaisiin ratkaisuihin. (Gallagher 2016; Swanson 2019.)

esitystekniikassa digitaalisia äänen siirtoprotokollia käytetään esimerkiksi korvaamaan analogista monikanavakaapelia lavan ja miksauspisteen välillä. Tällä saavutetaan kaapeloinnin helpottuminen ja audiosignaalin muuttumattomuus etäisyydestä johtumatta. (Swanson 2019.) Digitaalisia äänen siirtoprotokollia voidaan käyttää myös lyhyillä matkoilla tai pienemmällä kanavamäärällä, jolloin vältetään turhia AD- ja DA-muunnoksia ja saavutetaan signaalin muuttumattomuus. Esimerkiksi kahden kanavan siirtämiseen kykenevää AES3-protokollaa

voidaan käyttää siirtämään audiota esimerkiksi päätevahvistimille tai festivaalitalanteessa vierailevalta miksaajalta digitaalisesta äänimikseristä talon äänijärjestelmään.

5.2 Digitaalisten ääniprotokollien vertailtavat ominaisuudet

5.2.1 Viive

Viiveellä (engl. latency) tarkoitetaan sitä aikaa, joka signaalilla kestää kulkea järjestelmän läpi. Digitaalisen äänen siirrossa viivettä aiheuttaa esimerkiksi AD- ja DA-muunnos, virheenkorjaus, puskuroidi ja digitaalisen signaalin käsittely. Verrattuna analogisiin järjestelmiin on digitaalisessa äänen siirrossa aina enemmän viivettä. (NTI AUDIO; McCarthy 2013 41.) Äänijärjestelmissä järjestelmän kokonaisviive voidaankin ajatella olevan se aika, mikä äänellä kestää kulkeutua siitä, kun se taltioidaan mikrofoniin ja taas toistetaan kaiuttimella. Liian suuri viive voi olla ongelmallista varsinkin äänen monitoroinnissa soittajille. Lähtökohteisesti käytettäessä lattialle sijoitettuja monitorikaiuttimia on suurempi viive hyväksytympää kuin korvamonitorointia käytettäessä. Hyväksyttävän viiveen määrään vaikuttaa monitorointitavan lisäksi myös muusikon instrumentti. Esimerkiksi käytettäessä korvamonitorointia on laulaja herkempi latenssille verrattuna kosketinsoittajaan tai kitaristiin. Vastaavasti käytettäessä monitorikaiutinta ei laulajan kokemus viiveestä ole niin merkittävä kuin esimerkiksi kitaristeilla. (Henshall, 2016; Lester Boley 2007.)

Viivettä signaaliin siirrossa aiheuttaa esimerkiksi AD- ja DA-muunnokset ja mahdolliset näytteenottotaajuuden muunnokset. Tästä syystä, kun signaali on muunnettu digitaalisiksi, kannattaa se pitää mahdollisimman pitkään digitaalisena signaaliketjussa. Näin viive saadaan pidettyä pienempänä ja mahdolliset AD- ja DA-muunnosten aiheuttamat muutokset signaaliin poissa. Viivettä voi aiheuttaa myös digitaalinen signaalin käsittely. (McNell 2008.)

Tietoverkkopohjaisissa ratkaisuissa tarvitaan datan puskuroidi, sillä pakettien kulkemiseen saattaa kulua vaihteleva aika. Esimerkiksi, jos paketti myöhästyy

hieman ja audiota pitäisi toistaa ja toistettavaa dataa ei ole saapunut, tulisi toistavan pään valita mitä se tekee. Mikään valinta ei tässä tapauksessa olisi täysin oikein ja aiheuttaisi virhettä audioon. Tämän takia dataa puskuroidaan, vaikka se lisääkin viivettä. Mitä isompaa puskuria käytetään sitä enemmän vaihtelua datan saapumisajassa järjestelmä kestää. Kuitenkin isompi puskuri lisää järjestelmän viivettä. (Fonseca & Monteiro 2005.)

5.2.2 Signaalin jaeltavuus

Toinen vertailtava ominaisuus viiveen ohella on se, kuinka helppoa digitaalisen audio signaalin jakelu ja reitittäminen eri laitteille on. Reitittämisellä tarkoitetaan audiosignaalin lähettämistä pisteestä A pisteeseen B (Albanese 2023). Jaeltavuudella tässä yhteydessä tarkoitetaan signaalin jakamista yhdeltä laitteelta usealle laitteelle. Verkkopohjaiset ratkaisut tarjoavat yleensä paljon muita ratkaisuja joustavammalla reititettävyydellä verrattuna analogiseen audioon tai digitaalisiin audioprotokolliin, jotka eivät hyödynnä verkkopohjaisia ratkaisuja. (AES 2009.)

Esitysteknisissä sovelluksissa sama signaali on usein saatava ainakin kahteen, ellei jopa useampaan laitteeseen kerralla. Esimerkiksi lavalta tulevat mikrofoni-signaalit on saatava sekä monitorimikseriin ja saliäänimikseriin. Näiden lisäksi signaalit voitaisiin tarvita äänitystä varten tietokoneelle ja hybriditapahtumaa tehdessä vielä erilliselle striimimikserille. Mikserille tulevien signaalien lisäksi voi tarve olla siirtää signaaleja myös mikseriltä lavalle tai toiselle mikserille esimerkiksi puheyhteyksiä varten. Yleisesti mahdollisuus signaalin siirtämiselle useampaan kuin yhteen suuntaan on siis toivottavaa. Vertaillessa signaalien jaeltavuutta voidaan miettiä esimerkiksi, vaatiiko signaalin jakelu eri paikkoihin erillisiä laitteita ja voidaanko siirtotie toteuttaa kahdennettä. Vertaillessa voidaan arvottaa myös sitä, vaatiiko signaalinjakelu ylimääräistä kaapelointia ja kuinka joustava järjestelmä on lähettävien ja vastaanottavien laitteiden lukumäärän suhteen.

5.2.3 Muut vertailtavat ominaisuudet

Muita vertailtavia ominaisuuksia ovat esimerkiksi maksimissaan siirrettävät kanavamäärät, mahdolliset näytteenottotaajuudet ja kaapelointiin liittyvä verkkotopologia sekä kuinka signaalin kellotus on toteutettu. Maksimissaan siirretään kanavamäärään vaikuttaa tietenkin siirtotien kaistanleveys ja siirrettävän tiedon määrä. Siirrettävän tiedon määrään vaikuttaa digitaalisessa audiossa näytteenottotaajuus ja bittisyvyys sekä muu mahdollinen audion mukana siirrettävä tieto. Esimerkkinä muusta siirrettävästä tiedosta voi olla esimerkiksi erilainen kontrollidata ja kello. (AES 2009).

Myös helppokäyttöisyyttä voitaisiin vertailla, mutta tämän ollessa käyttäjien kokemus asia on sen mittaaminen vaikeaa varsinkin, kun käyttäjillä on yleensä eri määrä kokemusta eri protokollien käytöstä. Kustannustehokkuutta voidaan myös pitää yhtenä vertailukohtana ja sitä tässä työssä myös sivutaan. Kustannustehokkuuteen vaikuttaa tietenkin yhteensopivuus jo käytössä olevat laitteiden kanssa ja laitteissa valmiiksi olevat protokollat. Esimerkkinä Danten tai MADI:n lisääminen Allen & Heathin tai Behringerin miksereihin tehdään laajenuskorttien avulla. Nämä tietenkin kustantavat enemmän, kuin laitteissa valmiiksi olevien protokollien käyttö. Kustannustehokkuuteen vaikuttaa myös signaalin reitittämiseen vaadittavat erilliset laitteet.

Äänenlaatu voitaisiin ottaa myös yhdeksi vertailtavaksi arvoksi. Käytännön työkentelyssä koetut äänenlaatuerot johtuvat kuitenkin usein järjestelmien erilaisista analogisista komponenteista esimerkiksi erilaisista mikrofonietuasteista. Näiden tuottama ero signaalissa ei taas liity itse käytettävään audionsiirtoprotokollaan. (Yamaha 2023.)

5.3 Fyysisen kerroksen ja OSI-mallin ulkopuoliset menetelmät

Monet nykyäänkin käytössä olevat audionsiirtoprotokollat sijoittuvat OSI-mallin kerrokselle yksi eli fyysiselle kerrokselle. Nämä protokollat käyttävät esimerkiksi vain kaapelointistandardeja ja ne eivät voi käyttää siirtoyhteyskerroksen standardeja eli ne eivät voi esimerkiksi hyödyntää kytkinverkkoja. Fyysisen kerroksen standardeja on esimerkiksi AES50. (Leafblad 2020.) Fyysisen kerroksen tiedonsiirto on yksinkertaisempaa kuin siirtoyhteyskerroksen tai verkkokerroksen. Tieto voi olla paketoitua, mutta se on standardikohtaista tai se voi olla paketoitu Ethernet-standardin mukaisesti, mutta se ei kuitenkaan ole yhteensopivaa esimerkiksi siirtoyhteyskerroksen protokollien kanssa. (Ware 2015; AES 2011.) Nykyään käytössä on myös protokollia, jotka eivät ainakaan lähtökohtaisesti hyödynnä OSI-mallin mukaisia protokollia. Esimerkkeinä tästä on vieläkin laajasti käytössä oleva Multichannel Audio Digital Interface eli MADi ja AES3.

5.4 Siirtoyhteyskerroksen ja verkkokerroksen ratkaisut

OSI-mallin kerroksille kaksi sijoittuvia protokollia ovat esimerkiksi Allen & Heath'in gigaACE ja Waves SoundGrid. Nämä paketoivat audiodatan Ethernet-paketteihin, mutta eivät OSI-mallin kolmannen kerroksen mukaisiin paketteihin. Siirtoyhteyskerroksen protokollat käyttävät hyväkseen fyysisenkerroksen palveluja eli esimerkiksi liittimiä. Siirtoyhteyskerroksen protokollat voivat hyödyntää esimerkiksi verkkokytkimiä, mutta ilman että hyödynnetään mitään verkkokerroksen tai korkeampien kerrosten palveluita. (Allen & Heath i.a; Waves i.a.)

Siirtoyhteyskerroksen palvelut mahdollistavatkin fyysistä kerrosta laajemmat mahdollisuudet signaalin jakelulle, mutta eivät kuitenkaan niin laajoja mahdollisuuksia kuin verkkokerroksen protokollat. Siirtoyhteyskerroksen protokollat voivat olla myös halvempia kustannuksiltaan, sekä mahdollisesti yksinkertaisempia käyttää verrattuna verkkokerroksen protokolliin. (Allen & Heath i.a.)

OSI-mallin kolmannelle kerrokselle eli verkkokerrokselle sijoituvia protokollia ovat esimerkiksi Audinaten kehittämä Dante ja AES67. Verkkokerroksen protokollissa audiodata pakataan IP-protokollan mukaisiin paketteihin. (Ware 2015.) Verkkokerroksen palveluiden hyödyntäminen mahdollistaa audion siirron ja reitittämisen monipuolisemmin kuin siirtoyhteyserroksen protokollissa. Verkkoyhteyserroksen palvelut mahdollistavat digitaalisen audioprotokollan toimimisen samassa verkossa muun verkkoliikenteen kanssa. Siirtämällä audiodata samassa verkossa muun tietoliikenteen kanssa voidaan pienentää kustannuksia. (LDA Audiotech 2023). Verkkokerroksen protokollien käyttäminen voi joissain tapauksissa vaatia myös enemmän osaamista järjestelmän pystyttämässä ja käyttämisessä. (Allen & Heath i.a.)

6 Käytännön vertailu eri protokollien välillä

6.1 Vertailtavien protokollien valinta

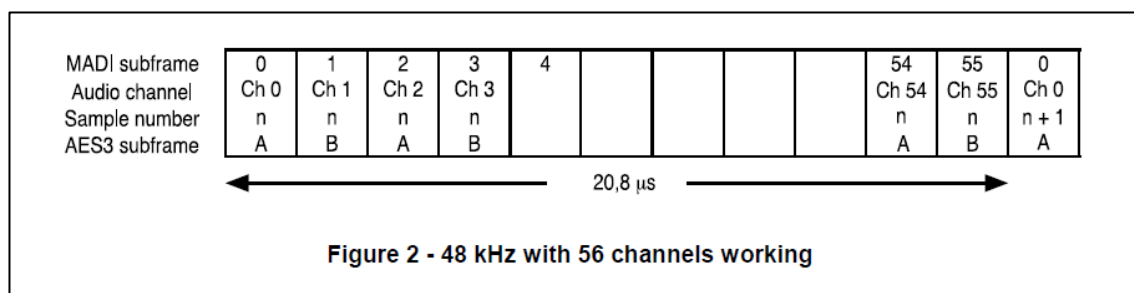
Vertailtaviksi protokolliksi valittiin kaksi käytössä olevaa ja teknisesti toisistaan tarpeeksi erottuvaa protokollaa MADi ja Dante. Protokollat erottuvat toisistaan esimerkiksi tiedonsiirtotapojen, kaapeloinnin, avoimuuden sekä signaalin jaeltavuuden ja reititettävyyden kannalta. Molempia protokollia on mahdollista käyttää esimerkiksi eri valmistajien äänimiksauspöytien kanssa. Joillain valmistajilla tuki valittuihin protokollisiin löytyy valmiina laitteista, ja jotkin laitteet tarvitsevat erillisen laajennuskortin. Tarpeeksi erilaisten protokollien valinnalla halutaan myös saavuttaa selkeät tulokset käytännön mittauksissa.

6.1.1 MADi

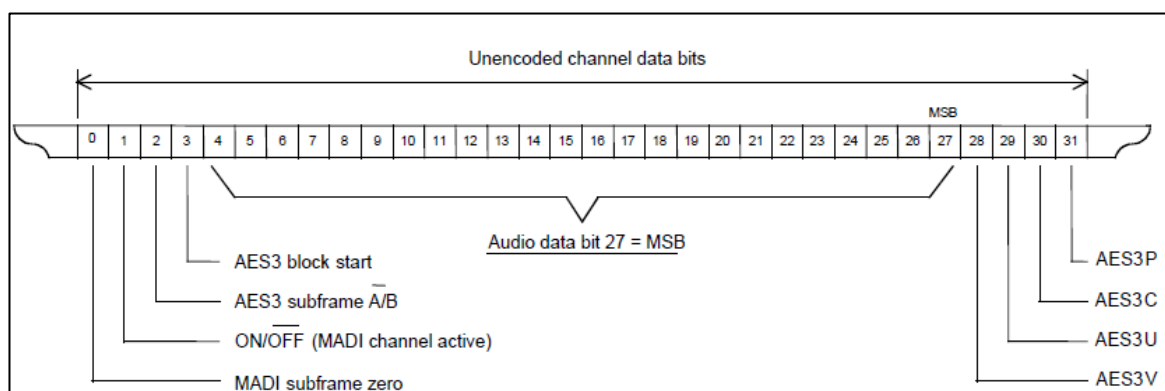
MADi on point-to-point-simpleksi järjestelmä. Siinä tietoa siirretään yhdessä tiedonsiirtoväylässä vain yhteen suuntaan, ja täten esimerkiksi äänimikserille tarvitaan erilliset johtimet tulevalle ja lähtevälle signaalille. Monikanavaisen signaalin kuljettamiseen MADi:ssa käytetään aikapohjaista multipleksausta. Tämän avulla yhdessä johtimessa saadaan kuljetettua jopa 64 kanavaa audiota.

MADI:n käyttämänäytteenottotaajuus voi olla 48 kHz–192 kHz ja maksimibittisyvyys 24 bittiä. MADI-standardin määrittää Audio Engineering Societyn AES10-Standardi. (Gallagher 2016; Audio Engineering Society, 2005.)

MADI-signaali voidaan esittää koostuvan MADI-frameista eli kehyksistä. Kehys määrittelee aikajakson, jolla äänisignaalit lähetetään. Kehys koostuu peräkkäin asetetuista 32-bittisistä kanavista, joista käytetään myös termiä subframe. Subframe sisältää itse audiodataa 24 bittiä ja muuta dataa 8 bittiä. Muu data pitää sisällään esimerkiksi tietoa kanavan tilasta, synkronoinnista ja virheenhallinnasta. MADI-signaali koostuu siis peräkkäin lähetetyistä kehyksistä. Madi kehystä ja kanavan rakennetta esitetään kuvalla neljä ja viisi.



Kuva 4 MADI Kehys (frame) (Audio Engineering Society, 2005)



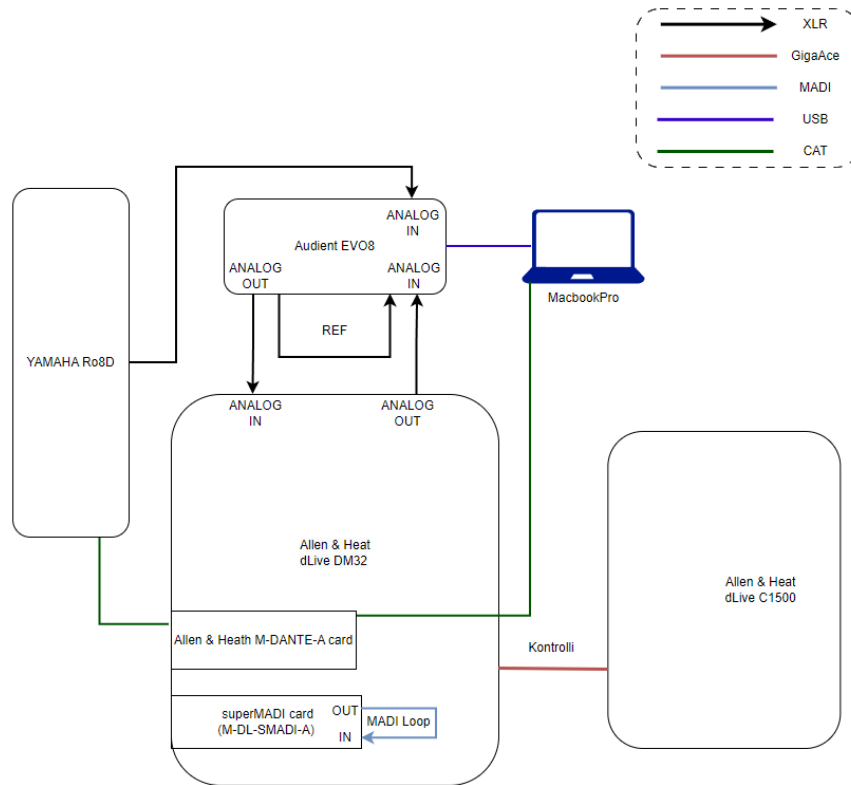
Kuva 5 MADI kanava (Audio Engineering Society, 2005)

6.1.2 Dante

Audinateen kehittämä Dante-protokolla on verkkokerroksen äänen siirtoprotokolla. Se käyttää audion siirtämiseen UDP-protokollan mukaista pakettiliikennettä. Dante mahdollistaa näytteenottotaajuuudet 41,1 kHz–192 kHz väliltä ja 16, 24 tai 32 bittisyvyyden. (Audinate i.a. c; Audinate i.a. a.) Dante mahdollistaa maksimissaan 512 kanavaa sisään ja ulos yhdelle laitteelle. Laitteen sisään- ja ulossyöttöjen määrän määrittää sen sisältämä dantepiirisarja. Dante mahdollistaa myös AVoverIP ratkaisuja, mutta jätän ne tässä opinnäytteessä käsittelemättä. Dante-signaalien reititykseen käytetään Dante Controller -ohjelmistoa tai laitteesta riippuen se on mahdollista myös suoraan itse laitteesta. (Audinate e i.a.)

6.2 Koejärjestelmä

Koejärjestelmä koostuu Allen & Heathin DM32 Mixrackista ja sen ohjaimesta Allen & Heathin dLive C1500. DM32 Mixrackin laajennuskorttipaikoissa on MDLDANT64-Dante-laajennuskortti ja M-DL-SMADI-A MADI-laajennuskortti. Mittaukseen käytetään Pro Tools -nimistä digitaalista äänityöasemaa. Signaalin saamiseksi äänityöasemaan ja sieltä ulos käytetään Audientin EVO8-äänikorttia. Järjestelmä kellottuu sen Dante-laajennuskortista. Kuvassa kuusi esitetään koejärjestelmän kytkentä ja laitteet.



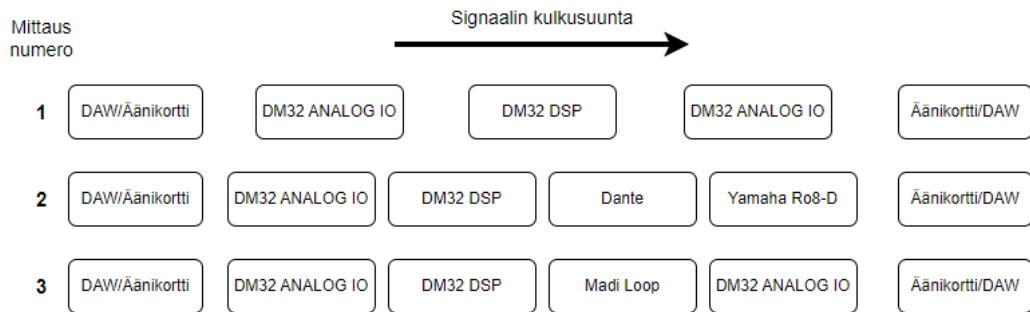
Kuva 6 Järjestelmäkuva mittauksiin käytettävästä järjestelmästä

Viiveen mittaamista varten tehdään kolme erilaista mittausta. Ensimmäisessä mittauksessa signaali reititetään kulkemaan suoraan DM32 Mixrackin analogisesta sisääntulosta analogiseen ulostuloon. Tämän mittauksen tavoitteena on saada tietoon järjestelmän viive ilman Danten tai MADI:n vaikutusta.

Toisessa mittauksessa signaali kulkee DM32 Mixrackin analogiseen sisääntuloon, josta se ohjataan Dante-laajennuskortin ulostulosta Yamaha Ro8-D:n Dante sisääntuloon ja siitä analogiseen ulostuloon. Tämän mittauksen tarkoituksena on selvittää Danten lisäämä viive signaalitiehen. Mittaus toistetaan asettamalla Ro8-D:n ja DM32:n Dante viiveet arvoilla 0,25 ms, 1 ms ja 5 ms.

Kolmannessa mittauksessa signaali on reititetty DM32 Mixrackin analogiseen sisääntuloon, josta se ohjataan MADI-laajennuskortin ulostuloon yksi ja siitä

koaksiaalikaapelilla MADI-laajennuskortin sisääntuloon yksi. Siitä signaali ohjataan DM32 Mixrackin analogiseen ulostuloon. Tämän mittauksen tarkoituksena on selvittää MADI:n lisäämä viive signaalitiehen. Kuva seitsemän esittää mittausjärjestelmän signaalitiet.



Kuva 7 Mittausjärjestelmän signaalitie

Jokainen mittaus toistetaan käyttäen näytteenottataajuutta 48 ja 96 kHz. Bittisyvyytenä käytetään molemmissa mittauksissa 24 bittiä. Kaikissa näissä mittauksissa signaali syötetään äänityöasemasta äänikortin ulostulosta DM32 Mixrackin analogiseen sisääntuloon. Signaali otetaan sisään äänityöasemaan äänikortin analogisesta sisääntulosta. Koska signaalitie pidetään mahdollisimman muuttumattomana mittauksen välillä, poislukien digitaaliset reititykset, voidaan olettaa, ettei analoginen signaalitie vaikuta tuloksia vertaillen merkittävästi viiveeseen. Äänityöaseman näytteenottotaajuus on 96 kHz ja bittisyvyys 24. Mittausjärjestelmä ei ole digitaalisesti yhteydessä muuhun koejärjestelmään. Mittauksessa äänikortin toisesta ulostulosta otetaan sama mittaukseen käytettävä signaali ulos ja se otetaan sisään äänikortin toiseen sisääntuloon. Näin tuloksista saadaan vähennettyä äänikortin AD- ja DA-muunnosten aiheuttama viive. Mittauksen tulokset kirjataan ylös taulukkoon kaksi, joka esittää tuloksia vertaillen. Nämä mittaukset toistetaan vielä siirtämällä sekä MADI:n että Danten läpi maksimi kanavamäärät. Dantessa tämä tarkoittaa kyseisellä laajennuskortilla 64 kanavaa sisään ja ulos 96 tai 48 kHz näytteenottotaajuudella sekä

MADI:lla 64 kanavaa sisään ja ulos 48 kHz näytteenottotaajuudella ja 32 kanavaa sisään ja ulos 96 kHz näytteenottotaajuudella. Tämän avulla nähdään, vaikuttaako datamäärän lisääminen viiveeseen. Nämä tulokset esitetään taulukossa kolme. Signaalin reitittämiseen käytetään Allen & Heathin mikseristä löytyvää tie lines-ominaisuutta ja Danten kanssa Dante Controlleria.

Mittauksella ei päästä vertailemaan protokollien aiheuttamia absoluuttisia viiveitä, mutta tulokset ovat kuitenkin keskenään vertailukelpoisia, sillä järjestelmään muuten vaikuttavat viiveet ovat laskettavissa mittaustulosten avulla. Esimerkiksi järjestelmillä, joissa protokollat olisivat natiivisti tuettuja ilman lisäkortteja, voitaisiin päästä pienempiin kokonaisviiveisiin, mutta tällaisia järjestelmiä, joissa molemmat protokollat olisivat valmiina ilman laajennuskortteja, ei mittauskäyttöön ollut helposti saatavilla. Mittaustulosten avulla voidaan yleisesti vertailla verkkopohjaisten ratkaisujen eroa viiveessä yksinkertaisempiin digitaalisen tiedonsiirron ratkaisuihin.

6.3 Viiveen vertailu ja mittaustulokset

6.3.1 Viiveen vertailu

Viiveiden vertailuun käytetään Pro Tools -nimistä digitaalista äänityöasemaa. Viiveen vertailuun signaalina käytettiin 1 kHz siniaaltoa. Ensimmäisenä selvitetään mittausjärjestelmän aiheuttama viive. Tämä mitattiin reitittämällä signaalin suoraan ulos mittaukseen käytettävästä äänikortista suoraan sen sisääntuloon. Tämän jälkeen signaalien alkamisaikoja vertailtiin äänityöaseman aikajanalla. Tarkan signaalin alkamisajankohtaan päästiin äänityöaseman tab-to-transients-työkalun avulla. Äänitetyn signaalin alkamisajankohdasta vähennettiin mittasignaalin alkamisajankohta ja tästä saatiin mittalaitteiston viiveeksi 844 samplea.

Koska Dante-järjestelmään voidaan lisätä viivettä haluttu määrän ja tiedämme, kuinka paljon viivettä mittaukseen käytetty järjestelmä aiheuttaa, näillä tiedoilla voidaan laskea muusta järjestelmästä aiheutuva viivee. Dante-järjestelmän muu viive saatiin pääteltyä vertaamalla kahta eri Dante-mittausta ja vähentämällä

näistä tiedossa oleva lisätyn viiveen määrä. Eli kun tiedetään viiveen Danten asetetulla latenssi arvolla 0,25 ms ja 1 ms, tiedetään, että näiden Dantesta johtuva latenssi ero pitäisi olla 0,75 ms. Tämän avulla voidaan laskea muusta järjestelmästä aiheutuva latenssi. Dante-järjestelmässä tämä oli 48 kHz näytteenottotaajuudella 0,96 ms ja 96 kHz näytteenottotaajuudella 0,48 ms.

MADI-järjestelmässä muun järjestelmän aiheuttama viive saatiin mitattua reitittämällä signaali suoraan DM32:n analogisesta sisääntulosta analogiseen ulostuloon ilman, että se kiertää MADI-kortin ulostulosta takaisin sisääntuloon. DM32 mikseristä aiheutuva viive oli 44 samplea MADI:n tai Danten näytteenottotaajuudesta riippumatta. Tämän oletetaan johtuvan siitä, että DM32 toimii aina 96 kHz näytteenottotaajuudella riippumatta laajennuskorttien näytteenottotaajuuksista. Tämä tarkoittaisi myös sitä, että 48 kHz näytteenottotaajuuden mitauksissa tapahtuu näytteenottotaajuuden muutos, kun siirrytään laajennuskortteihin.

6.3.2 Mittaustulokset

Taulukossa kaksi esitetyissä tuloksissa on ilmoitetut luvut näytteinä. Nämä voidaan muuntaa millisekunneiksi jakamalla ne mittajärjestelmän näytteenottotaajuudella (96 kHz) ja kertomalla osamäärä tuhannella. Tuloksista on vähennetty mittajärjestelmän aiheuttama viive (844 näytettä).

Taulukko 2 Viiveet eri mittaustilanteissa yhdellä kanavalla

	Näytteenot- totaajuus 48 kHz	Näytteenot- totaajuus 96 kHz	Erotus muu järjestelmä – protokolla 48 kHz	Erotus muu järjestelmä – protokolla 96 kHz
Mikseri suora In out	44	44		
MADI	68	56	24	12
Dante 0,25 ms	116	72	24	24
Dante 1 ms	188	144	96	96
Dante 5 ms	572	528	480	480

Taulukosta kaksi nähdään Danten aiheuttaman viiveen menevän sen mukaan, kuinka se on Dante Controllerista asetettu. Danten viiveeseen ei vaikuta myöskään valittu näytteenottotaajuus. MADI:ssa viive muuttuu, kun näytteenotto taajuutta muutetaan. Tuplatessa näytteenottotaajuuden latenssi puolittuu. Tästä voidaan päätellä, että MADI:a käytettäessä tarvitaan tietty määrän näytteitä audion siirtoa varten ja kun näytteenottotaajuutta nostetaan, saadaan tämä näytemäärä nopeammin kasaan. Tällöin tuplaamalla näytteenottotaajuus puolittuu myös latenssin määrä. Tuloksista voidaan myös päätellä, että MADI:lla päästään pienempään viiveeseen. Käytännön kannalta olisi tuloksia järkevää vertailla Danten viivearvolla 1 ms, joka on tyypillinen oletusviive Dante laitteille (Audinate d, 2023).

Taulukko 3 Viiveet eri mittaustilanteissa täydellä kanavamäärällä

	48 kHz	96 kHz	Erotus muu järjestelmä – protokolla 48 kHz	Erotus muu järjestelmä – protokolla 96 kHz
MADI	68	56	24	12
Dante 1 ms	188	144	96	96

Siirrettävällä kanavamäärällä ei ollut merkitystä, sillä molemmissa järjestelmissä viive on kiinteä kanavamäärästä riippumatta.

Digitaalista äänijärjestelmää valittaessa haluttaisiin vertailla kahta erillistä järjestelmää. Tällöin mittaus voitaisiin suorittaa käyttäen samaa periaatetta eli mittaamalla, kuinka pitkä aika signaalilla menee kulkea järjestelmän läpi analogisesta sisääntulosta analogiseen ulostuloon. Mittaamalla kaksi täysin erilaista järjestelmää saataisiin käyttöä varten ajatellen hyvää dataa viiveestä, ja tällöin voitaisiin myös vertailla esimerkiksi erilaisen prosessoinnin ja äänimikserin sisäisten reititysten vaikutusta viiveeseen.

6.3.3 Järjestelmän kokonaisviive ja siirtotavan merkitys siihen

Järjestelmän kokonaisviiveeksi MADI:a käytettäessä saatiin pienimmillään 56 samplea eli noin 0,6 ms. Vertailuun Danten viiveeksi valitaan sen yhden millisekunnin latenssivalinnan mukainen viive. Yhteensä järjestelmän viivettä Dantea käytettäessä oli tällöin 96 kHz näytteenottotaajuudella 144 samplea eli 1,5 ms. Jo tässä huomataan, että MADI:a käytettäessä järjestelmän kokonaisviive saadaan pienemmäksi. Tämä johtuu siitä, että Dante on tietoverkkopohjainen ratkaisu ja vaatii isomman puskurin tiedonsiirtoa varten. MADI perustuu taas yksinkertaisempiin digitaalisen tiedonsiirron menetelmiin, jolloin se ei vaadi niin suurta puskurointia. Voidaan myös huomata, että siirrettävällä kanavamäärällä ei ole vaikutusta Danten tai MADI:n viiveisiin. Dantessa viive on aina se, joksi

se määritetään Dante Controllerista. MADI:n kanssa viive ei taas muutu sen tiedonsiirtotavan takia. Tiedonsiirto MADI:lla perustuu MADI-kehyksiin, jotka pitää aina sisällään tietyn määrän kanavia. Kehyksen sisällä oleva kanava taas pitää sisällään tiedon siitä, onko kanava käytössä vai ei.

MADI:n ja Danten välisen viive-eron merkitystä kokonaisessa äänijärjestelmässä voidaan miettiä esimerkiksi siten, kuinka pitkälle ääni ehtii kulkea tuossa ajassa. Ääni kulkee ilmassa 20 celsiusasteen lämpötilassa noin 343 metriä sekunnissa. Tästä voidaan laskea, että Dante-järjestelmän 1,5 ms viive vastaa noin 0,5 metriä ja MADI-järjestelmän 0,6 ms vastaa siis noin 0,2 metriä. Muusikon monitoroinnissa tällaiset viive-erot käytettäessä lattiamonitorikaiuttimia tarkoittavat siis vain pieniä etäisyyden muutoksia kaiuttimen ja soittajan välillä, mikä ei vaikuttaisi merkittävästi muusikon kokemukseen. Käytettäessä korva-monitorointia ei muusikon pitäisi myöskään huomata vielä näin pientä viivettä suorana viiveen tunteena, mutta on mahdollista, että jo näinkin pieni viive aiheuttaa joitain artefakteja kuuntelussa. (Lester & Boley 2017.) Kuitenkin mikäli muunnoksia Dantesta tai MADI:sta analogiseksi audiosignaaliiksi ja takaisin digitaaliseksi olisi monta peräkkäin, voisi signaaliin alkaa muodostumaan jo merkittäviä määriä viivettä. Pitää muistaa, että esimerkiksi nykyaikaisissa päätevahvistimissa on mukana digitaalista signaalinkäsittelyä, mikä lisää signaaliin viivettä. Myös esimerkiksi langattomat korva-monitorointijärjestelmät tai langattomat mikrofonit voivat lisätä signaaliin viivettä. Siksi viivettä vertaillessa onkin tärkeää mitata mahdollisimman tarkasti koko järjestelmä eikä vain yhtä osaa siitä. Voidaankin todeta, että yksistään digitaalisen äänen siirtoprotokollan viiveellä ei ole merkitystä järjestelmän kokonaisviiveen kannalta, mutta se on hyvä tiedostaa osana sitä.

6.4 Signaalin jakelujärjestelmät

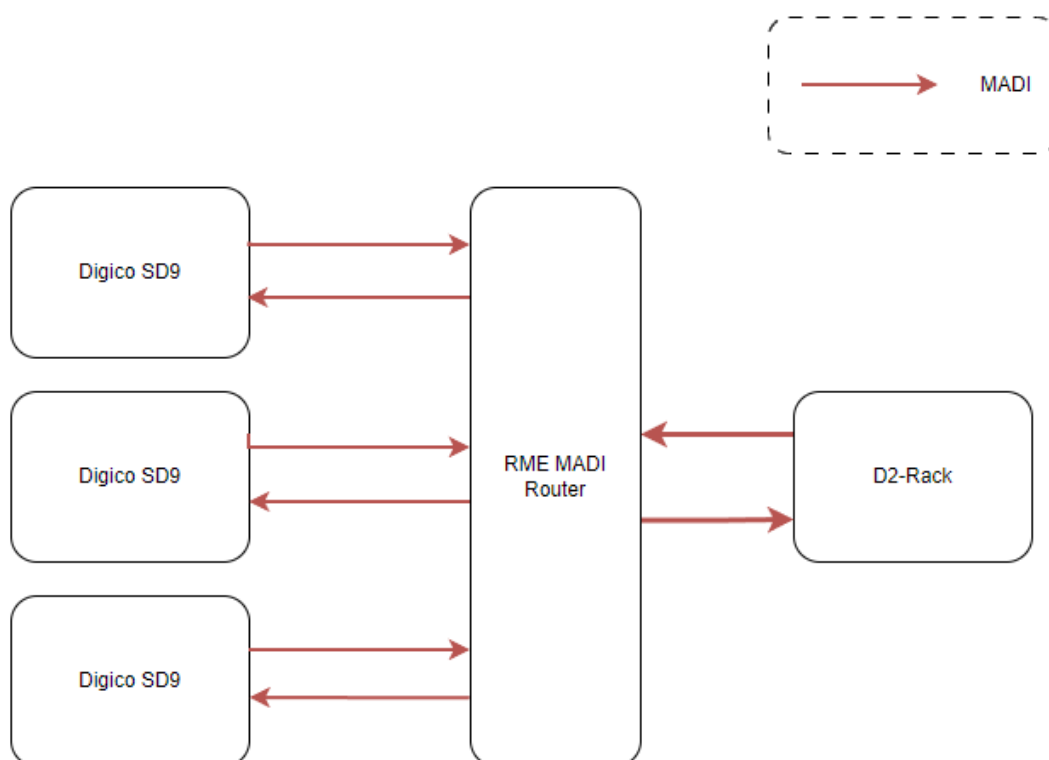
Vertaillessa MADI:n ja Danten luomia mahdollisuuksia signaalin jakelulle voidaan todeta molempien suoriutuvan tavallisissa käyttökohteissa. Kuitenkin skaalautuvuuden osalta ja signaalin reitittämisen monipuolisuuden kannalta

voimme huomata Danten olevan parempi ratkaisu. Monipuoliset reititysmahdollisuudet onnistuvat myös MADI:lla, mutta se vaatii erillisiä laitteita. Esimerkkinä tästä on esimerkkijärjestelmässä käytetty RME MADI Router. Laite on matriisi, joka mahdollistaa tulevien ja lähtevien reitittämisen vapaasti eri sisääntulojen ja ulostulojen välillä. (RME, 2023) Jos MADI-järjestelmään pitäisi lisätä uusia laitteita tarvittaisiin joko toinen MADI-matriisi tai laite, jossa on enemmän sisään- ja ulostuloja sekä enemmän reitityskapasiteettia. Dante-pohjaisessa järjestelmässä laitteiden lisääminen ei välttämättä tarkoittaisi laitteiden uusimista. Kuitenkin jos verkkokyttimeen tarvittaisiin enemmän portteja, olisi tällaisen uusiminen halvempaa kuin suurten MADI-matriisien.

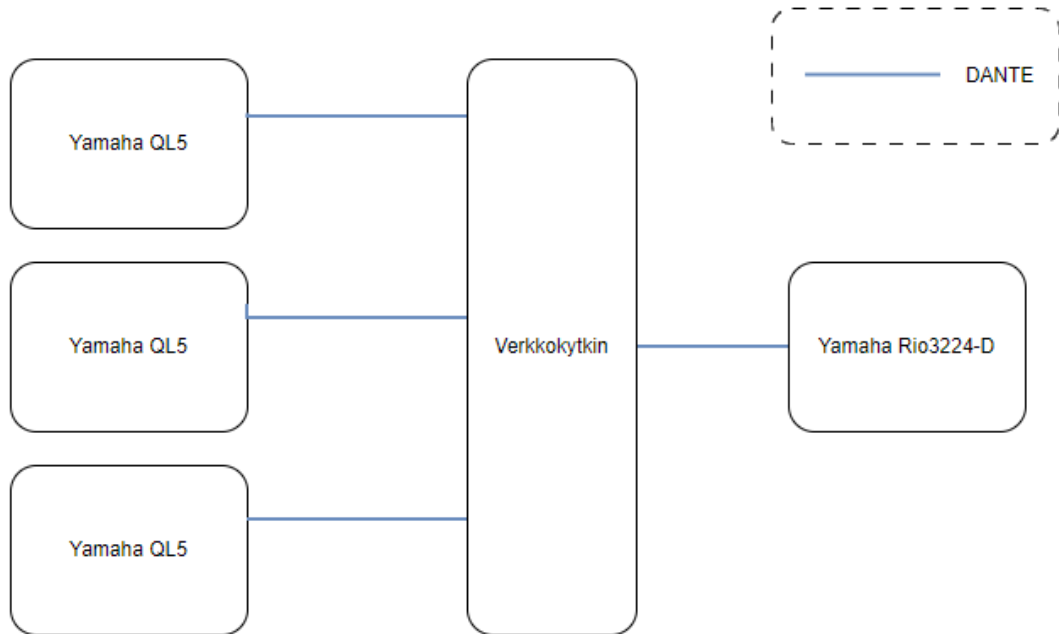
Kaapeloinnin osalta voidaan Danten katsoa olevan myös joustavampi järjestelmä. Koska Dante on pakettipohjaista tietoverkkoliikennettä, voidaan se sulauttaa jo useisiin valmiina oleviin tietoverkkoihin ilman uusien kaapelivetojen tekemistä audion siirtoa varten. Dante mahdollistaa myös kaapeloinnin osalta kahdennetun järjestelmän rakentamisen, mitä MADI ei protokollana suoraan tue. Kahdennus tuplaa tarvittavan kaapeloinnin määrän, mutta esimerkiksi verkkokytinten Link Aggregation Control Protocol (LACP) ja virtuaalilähiverkko ominaisuuksia hyödyntäen voidaan säästää pitkissä kaapelivedoissa ja verkkokytinten määrässä järjestelmässä. (Audinate 2021.)

Dante-järjestelmää käyttäessä reititystä voi hallita Dante Controller-ohjelmistolla, jolla on myös mahdollista monitoroida laitteiden ja yhteyksien tilaa. MADI:a käytettäessä ei tällaista mahdollisuutta ainakaan suoraan ole. Dante mahdollistaa myös tietokoneiden liittämisen audioverkkoon ilman ylimääräisiä laitteita Dante Virtual Soundcard tai Dante Via -ohjelmistojen avulla. Jos tietokoneesta halutaan ulos MADI-signaalia, tarvitaan siihen yleensä USB:llä liitettävä äänikortti. Monet Dante-laitteet ovat myös yhteensopivia avoimen AES67-protokollan kanssa. Tämä mahdollistaa laajemman yhteensopivuuden ja integraation jo olemassa oleviin ja tuleviin äänijärjestelmiin. Ohjelmistot ovat myös fyysistä laitteistoa kustannustehokkaampia ratkaisuja.

Signaalinjakelun osalta voidaan todeta Danten olevan monipuolisempi ja kustannustehokkaampi ratkaisu MADI:in verrattuna. MADI:n hyväksi puoleksi voimme katsoa sen yksinkertaisuuden ja helpon käyttöönoton verrattuna Danten. Sillä mikäli Dantea haluaa hyödyntää ammattimaisesti, tarvitsee käyttäjän ymmärtää tietoverkkojen perusteita.



Kuva 8 Esimerkkikytkentäkuva MADI-pohjaisesta järjestelmästä.



Kuva 9 Esimerkkikytkentäkuva Dante-pohjaisesta järjestelmästä.

Esimerkkijärjestelmät kuvassa kahdeksan ja yhdeksän muistuttavat kytkennöiltään paljon toisiaan, mutta todellisuudessa eroavaisuudet ovat silti melko suuria. Dante-pohjaisen järjestelmän kytkentä ei ole kahdennettu. Molemmissa järjestelmissä on yksi lavarasia yhdistetty kolmeen äänimikseriin. Molemmissa järjestelmissä on mahdollista reitittää signaali kaikkien laitteiden välillä.

6.5 Muita mitattavia ominaisuuksia

Muita mitattavia ominaisuuksia voisi olla esimerkiksi järjestelmien taajuusvasteet, vaihevasteet ja särö. Myös näitä ominaisuuksia tarkasteltiin ja pohdittiin opinnäytteen mittauksia tehdessä Room EQ Wizard-ohjelman avulla. Näiden ominaisuuksien osalta ei tarkastelussa paljastunut mitään odotuksista poikkeavaa. Näiden ominaisuuksien vertailu olisikin järkevämpää, jos tarkastelussa olisi kaksi analogisilta komponenteilta täysin poikkeavaa järjestelmää. Vertailtaessa kahta digitaalista ääniprotokollaa ei näiden arvojen välillä oleteta olevan eroja,

sillä digitaalisen äänen siirron tavoite on välttää signaalin muutokset tiedonsiirrossa.

7 Johtopäätökset

Vertailun ja viiveen mittausten perusteella voitaisiin arvioida, että järjestelmä, jossa on enemmän viivettä, olisi monipuolisempi signaalin jakelun osalta ja järjestelmä, jossa on vähemmän viivettä, olisi huonompi. Kuitenkin vertailun ja mittausten otoskoko laajasta valikoimasta erilaisia digitaalisia äänen siirtoprotokollia on pieni eikä tällaisia johtopäätöksiä voida suoraan tehdä. Kuitenkin tämä tieto vahvistaa olettamaa siitä, että yksinkertaisempi digitaalisen tiedonsiirtotapa on tietoverkkopohjaista tiedonsiirtoa nopeampaa. Koetulokset viiveen mittaamisen osalta osoittavat, että myös tietoverkkopohjaisilla ratkaisuilla päästään tarvittavan pieniin määriin viivettä esitystekniikan sovellusten kannalta.

Signaalin jakelun osalta mahdollistaa tietoverkko joustavamman ja mahdollisesti myös kustannustehokkaamman tavan jakaa digitaalista audiosignaalia. Kuitenkin käyttäessä tietoverkkopohjaisia ratkaisuja tarvitaan usein käyttäjältä osamista vähintään tietoverkon perusteista ratkaisujen täyden potentiaalin hyödyntämiseksi. Yksinkertaisempia digitaalisen tiedonsiirron menetelmiä voidaan myös käyttää onnistuneesti esitysteknisissä sovelluksissa, mutta niiden rajoitteet tulevat yleensä vastaan järjestelmiä laajennettaessa. Tämä tuli ilmi myös esimerkkijärjestelmistä työn kokeellisessa osiossa.

Työn tarkkuuta voisi parantaa hankkimalla kaksi täysin identtistä järjestelmää, jolloin esimerkiksi viivemittauksessa äänen ulostulot saataisiin samanlaisten DA-muuntimien läpi. Reitittämällä signaali Dantella saman Dante-kortin sisällä eivät Dante-verkon viiveen valinnat vaikuttaneet tuloksiin. Tällainen mittaus ei tuottaisi todenmukaisia tuloksia. Signaalin jakelujärjestelmiä voitaisiin testata myös käytännössä useiden protokollien välillä, ja tällaisella vertailulla voitaisiin arvioida myös käyttäjäystävällisyyttä ja käytön sujuvuutta. Käytännön testeissä voisi tulla ilmi myös asioita, jotka eivät teoriapohjaisessa vertailussa kävisi ilmi.

Kuten työssä jo aikaisemmin sivuttiin, voisi vertailla myös kellosignaalien siirtoa ja kontrollidatan siirtoa äänen siirron ohella.

Jos vertailun ja tehtyjen testien perusteella pitäisi päättää, mikä on joustavin tapa siirtää audiosignaalia esitysteknisissä äänijärjestelmissä nykypäivänä, olisi helppo päätyä tietoverkkopohjaiseen ratkaisuun, jolla olisi mahdollisimman laaja tuki eri laitevalmistajien keskuudessa. Tietoverkkopohjaiset ratkaisut ovat myös viiveeltään tarpeeksi nopeita, joten niiden käyttö on myös siltä osin suositeltavaa.

Lähteet

AES, 2009. AES WHITE PAPER Best Practices in Network Audio. PDF-tiedosto. <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=14839>

AES, 2011. AES project report -Guidelines for AES standard for digital audio engineering -High resolution multi-channel audio interconnection (HRMAI), AES50. PDF-tiedosto. <https://www.aes.org/publications/standards/search.cfm?docID=45> (luettu 5.11.2023)

Albanese Anthony, 2023. Audio Routing: How to Send Signals to the Right Place. Verkkosivu blogikirjoitus. <https://blog.landr.com/audio-routing/>

Allen & Heath DX-gigaACE-white-paper. PDF-tiedosto <https://www.allen-heath.com/white-papers/> (Luettu 25.09.2023)

Audinate 2021. Managed Switch Tutorial. PDF-tiedosto. https://assets.audinate.com/wp-content/uploads/2021/11/Managed-Switch-Tutorial_-_Draft-v0.993.pdf (Luetettu 2.10.2023)

Audinate i.a.a. Dante Information for Network Administrators. PDF-tiedosto. <https://assets.audinate.com/wp-content/uploads/2022/03/dante-information-for-network-admins.pdf> (luettu 27.9.2023)

Audinate i.a.b. What are the benefits of AES67?. Verkkosivu. <https://www.audinate.com/learning/faqs/what-are-the-benefits-of-aes67> (viitattu 25.9.2023)

Audinate i.a.c. What is Dante? Verkkosivu. <https://www.audinate.com/meet-dante/what-is-dante> (luettu 26.9.2023)

Audinate i.a.d. Dante Controller User Guide. PDF-tiedosto. <https://dev.audinate.com/GA/dante-controller/userguide/pdf/latest/AUD-MAN-DanteController-4.9.x-v1.0.pdf> (luettu 15.10)

Audinate i.a.e. Audinate Dante Certification Level 1. Koulutusmateriaali. <https://www.audinate.com/learning/training-certification/dante-certification-program>

Audio Engineering Society 2005. AES information document for digital audio engineering – Engineering guidelines for the multichannel audio digital interface, AES10 (MADI). <https://www.aes.org/publications/standards/search.cfm?docID=43> PDF-tiedosto.

Lester Michael ja Boley Jon, 2007. The Effects of Latency on Live Sound Monitoring. PDF-tiedosto. <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=14256>

Cotton Michelle, Vegoda Leo, Meyer David 2010. IANA guidelines for IPv4 multicast address assignments, RFC 5771. Verkkosivu. <https://www.rfc-editor.org/info/rfc5771> (viitattu 6.5.2023)

Fonseca Nuno & Monteiro Edmundo 2005. Audio Engineering Society Convention Paper 6474. PDF-tiedosto. <https://secure.aes.org/forum/pubs/conventions/?elib=13190> (viitattu 10.10.2023)

Gallagher Mitch 2016. Audio Networking Explained. Verkkosivu. <https://www.sweetwater.com/insync/audio-networking-explained/> (Luettu 26.9.2023)

GeeksforGeeks 2023. Differences between TCP and UDP. Verkkosivu. <https://www.geeksforgeeks.org/differences-between-tcp-and-udp/> (luettu 30.10.2023)

Henshall Marc 2016. Shure Whiteboard – Digital Wireless Latency Explained. Verkkosivu. <https://www.shure.com/en-US/performance-production/louder/shure-whiteboard-digital-wireless-latency-explained> (viitattu 22.09.2023)

Howell Wayne 2013. Rock Solid Ethernet. Cambridge: Entertainment Technology Press.

Huntington John 2021. Show Networks & Control Systems. Version 2.1. Brooklyn, NY: Zircon Designs Press.

Jaakonhuhta Hannu 2003. IT-Ensyklopedian. IT Press.

Kaurto Aleks 2018. Ethernet-pohjaisten automaatioverkkojen reaaliaikainen kunnonvalvonta. Opinnäytetyö, tampereen yliopisto teknisten tieteiden tiedekunta. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tyy-201811212639>

Laaksonen Jukka 2013. Äänityön kivijalka. Keuruu: Otavan Kirjapaino Oy.

LDA Audiotech 2023. ADVANTAGES OF USING AES67 OVER OTHER AUDIO-OVER-IP PROTOCOLS IN EN54 SYSTEMS. Blogikirjoitus. <https://lda-audiotech.com/en/2022/08/05/advantages-aes67-audio-over-ip-en54-systems/> (viitattu 25.09.2023)

Leafblad Dan 2020. Models, Layers & Protocols: More On The Basics Of Digital Audio Networking. Verkkosivu <https://www.prosoundweb.com/models-layers-protocols-more-on-the-basics-of-digital-audio-networking/> (viitattu 20.09.2023)

Maunula Juha 2011. Digitaalinen äänisignaali ja DA-muunnin. Opinnäytetyö. Tietotekniikan koulutusohjelma Tampereen ammattikorkeakoulu. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/28355/Maunula_Juha.pdf?sequence=1

McCarthy Bob 2013. Sound Systems: Design and Optimization. Burlington: Focal Press.

McNell David 2008. Networked Audio Transport. Verkkosivu. <https://web.archive.org/web/20080512013958/http://www.prosoundweb.com:80/study-hall/net/transport/audio.php> (luettu 28.9.2023)

National Instruments 2015. Digital Timing: Clock Signals, Jitter, Hystereisis, and Eye Diagrams. PDF-tiedosto. https://download.ni.com/evaluation/pxi/Digital_Timing.pdf

Rayming i.a. What is Digital Signals?. Verkkosivu <https://www.raypcb.com/digital-signals-and-gates/>. (luettu 10.11.2023)

RME. Madi Router tuotesivu. Verkkosivu <https://www.rme-audio.de/madi-router.html> (viitattu 2.10.2023)

Rouse Margaret 2018. Parallel Interface. Verkkosivu. <https://www.techopedia.com/definition/3657/parallel-interface> (viitattu 18.9.2023)

Rouse Margaret 2023 OSI Protocols. Verkkosivu <https://www.techopedia.com/definition/24961/osi-protocols> (viitattu 14.9.2023)

Smillie Grahame 1999. Analogue and digital communication techniques. Newnes An imprint of Elsevier Science

Swansson Andy 2019. Guide to Understanding Networked Audio. Verkkosivu. <https://www.sweetwater.com/insync/networked-audio-worship/> (Luettu 26.9.2023)

Ware Chris 2015. Audinate Networking 101. PDF-tiedosto. <https://my.audinate.com/sites/default/files/PDF/networking-101-audio-basics-avnw-orlando-150616-pres-audinate.pdf> (luettu 17.10.2023)

Waves i.a. How to Use SoundGrid Network in a VLAN. Verkkosivu <https://www.waves.com/support/how-to-use-soundgrid-network-in-a-vlan> (Viitattu 25.09.2023)

Yamaha i.a. AUDIO NETWORK BASICS (PART ONE): FIVE DISCUSSION TOPICS. Verkkosivu https://asia-latinamerica-mea.yamaha.com/en/products/contents/proaudio/training_support/micro_tutorial/20170427/index.html (viitattu 25.9.2023)