

Kuluttajan audiotekniikkaa

Lähteet: -Pohlman. (1995). "Principles of digital audio".

-Kontro, Yli-Hietanen, muita. "80545 Digital audio". Kurssin aiemmat luentomateriaalit, TTKK.

-Kurssin esitelmiä, 2000: Piispanen. "DAB – Digital audio broadcasting". Heinonen, Lattu. "Internet audio". Rehtonen, Koivusaari. "Audiotiedostojen digitaalinen vesileimaaminen".



Sisältö:

- Johdanto
- Virheenkorjaus
- Digitaalisen audio tallennusmuotoja
- Häviöllistä koodausta käyttäviä tallennusmuotoja
- Digitaalinen radio
- Audio Internetissä
- Audion vesileimaus
- Digitaaliset audioliitännät

1 Johdanto

- Tämä kalvosarja antaa yleistietoa audiotekniikasta ja käsityksen erinäisistä teknisistä ratkaisuista, joita tarvitaan käytännöllisen digitaalisen audion parissa
- Monilla sivuilla on *paljon* lukuarvoja ja teknisiä detaljeja
 - tämä on eksakti tapa kertoa ko. tekniikoista, mutta:
 - useimpia niitä ei ole tarkoitus opetella ulkoa
 - oppimistavoitteena on kyetä vastaamaan järkevästi maallikolle kysymykseen: "kerro minulle miten N toimii", missä N voi olla vaikkapa CD-levy tai digitaalinen radiolähetys

2 Virheenkorjaus

- Käytännössä kaikissa tallennus- ja siirtokanavissa tulee virheitä tallennettuun tai siirrettyyn dataan
- Digitaalisen tiedon luonne antaa mahdollisuuden korjata virheitä
 - digitaalinen tieto voidaan koodata ja varustaa redundantilla lisäinformaatiolla
 - auki koodatusta datasta voidaan tarkistaa tapahtuiko virheitä, ja mahdollisesti korjata virheet
- Virhetyypit
 - satunnaiset virheet (engl. *random errors*): tapahtuvat yksittäin, ilman riippuvuutta toisistaan
 - purskevirheet (engl. *burst errors*): useita peräkkäisiä arvoja tuhoutuu
- Virheenkorjauksen tavoitteita
 - hyvä virheenkorjauskyky sekä satunnaisille että purskevirheille
 - luotettava virheiden ilmaisu, vaikkei virhettä voitaisikaan korjata
 - pieni määrä redundanssia

Virheenkorjaus

Tehokas audiosignaalien virheenkorjaus

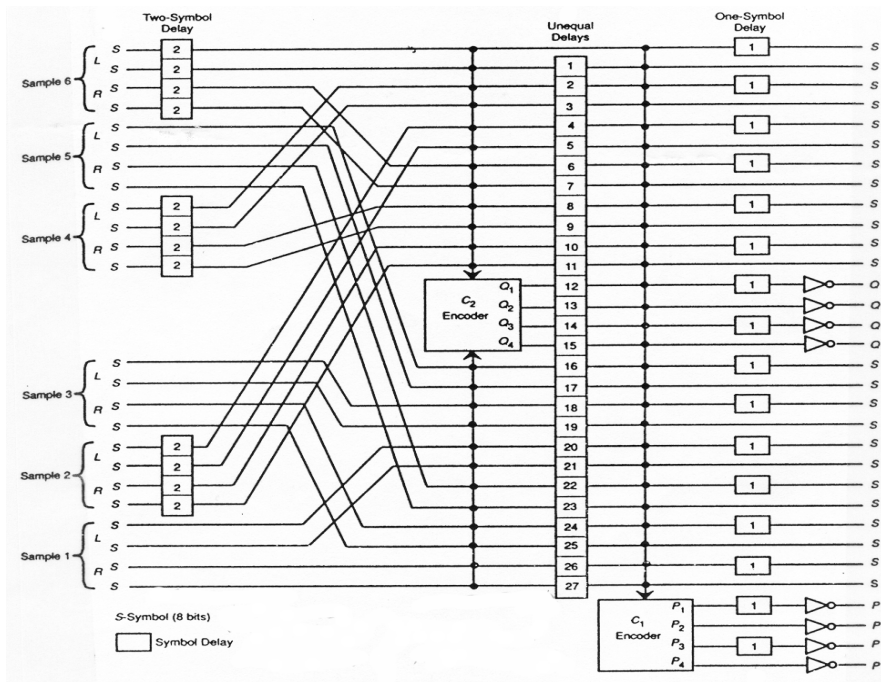
- Tavoitteena
 - kuultavien virheiden mahdollisimman pieni määrä sen jälkeen, kun virheenkorjaus ja virheiden kätöntä on tehty
 - redundantin tiedon määrä ja prosessointi minimoidaan
- Operaatioita
 - *virheen ilmaisu* käyttää redundanssia, jolla datan pätevyys tarkistetaan
 - *virheenkorjaus* hyödyntää redundanssia ja korvaa virheelliset data-arvot uudelleen lasketuilla pätevillä arvoilla
 - *virheiden kätöntätekniikoilla* korvataan virheellinen data suurinpiirtein oikealla
 - laajojen virheiden tapauksessa, tai tilanteissa joissa redundantti tieto ei riitä virheenkorjaukseen
 - pahimmassa tapauksessa, jolloin edes virheiden kätöntä ei ole mahdollista, järjestelmä kytkee ulostulon pois päältä sen sijaan että tuottaisi täysin väärää ääntä

2.1 CIRC–virheenkorjauskoodi

- Cross interleave Reed-Solomon code (CIRC)
- Reed-Solomon koodi
 - (n,k) lineaarinen blokkikoodi: $k:n$ symbolin datajoukko enkoodataan pidemmäksi $n:n$ symbolin koodisanaksi → lisätään redundanssia
 - esim. CD:ssä 24 datasyntolia paketoitaan (28,24) Reed-S. koodiksi
 - 4 pariteettisymbolia käytetään virheenkorjaukseen
 - tällöin koodin *minimietäisyys* on viisi
 - minimietäisyys: bittien määrä, jotka on muutettava jotta koodisana muuttuisi toiseksi koodisanaksi (tällöin virhettä ei voi edes havaita)
 - Reed-Solomon koodisana on melko suoraviivainen laskea, tällä kurssilla riittää tietää yllä mainitut koodin ulkoiset ominaisuudet
- CIRC:ssä on kaksi korjauskoodia lisäämään korjauskapasiteettia
 - C2-koodaus korjaa tehokkaasti purskevirheitä
 - C1-koodaus korjaa satunnaisia virheitä ja ilmaisee purskevirheitä
- Ristiin lomituksella (engl. *cross interleaving*) pariteetti saadaan korjaamaan purskevirheitä, ks. kaavio pari sivua myöhemmin
 - pariteetin tarkistus yleensä ottaen korjaa satunnaisia virheitä
- *Seuraavassa tarkastellaan lukuarvoiltaan CD-levyn CIRC-koodia*

2.2 CD-levyn CIRC–virheenkorjauskoodi

1. Sisääntulo
 - kaksitoista 16-bittistä sanaa (6 per kanava) yhdessä sisääntulokehyksessä jaetaan 24:ksi 8-bittiseksi symboliksi
2. C2 Reed-Solomon koodi
 - 24 datasyntolia paketoitaan (28,24) Reed-Solomon koodiksi
 - 4 pariteettisymbolia (Q) käytetään virheenkorjaukseen
3. Ristiinlomitus (engl. *cross interleaving*)
 - suojaamaan purskevirheitä vastaan (esim. pitkä naarmu levyssä): hajotetaan signaalin peräkkäiset näytteet laajemmalle alueelle levyllä
 - kaksi erillistä virheenkorjauskoodia, yksi koodi voi tarkistaa toisen
 - virheenkorjauskyky paranee
4. C1 Reed-Solomon koodi
 - C2-koodin ristiinlomitettua 28 symbolia paketoitaan uudestaan (32,28) R-S koodiksi, jälleen 4 pariteettisymbolia (P) virheenkorjaukseen
 - tehoa satunnaisten virheiden korjaukseen ja purskevirheiden ilmaisuun
5. Ulostulossa
 - puolet koodisanasta viivästetään 1-symbolin verran, jottei symbolien rajalle sattuva virhe tuhoaisi kahta symbolia



2.3 CD-levyn CIRC–koodin suorituskyky

- Molemmissa R-S koodereissa (C1 ja C2) on neljä pariteettibittiä, ja niiden minimietäisyys on viisi
 - minimietäisyys: bittien määrä, jotka on muutettava jotta koodisana muuttuisi toiseksi koodisanaksi
 - jos virheen kohtaa ei tiedetä, kaksi symbolia voidaan korjata
 - Jos virheiden määrä ylittää korjauskyvyn, virheet kätketään interpoloimalla
 - koska parillisia ja parittomia näytteitä lomitetaan mahdollisimman paljon, CIRC voi kätkä pitkätkin purskevirheet yksinkertaisella lineaarisella interpoloinnilla
 - CD: maksimipituus täysin korjattavissa olevalle purskeelle on noin 4000 databittiä (2.5 mm datauran pituudessa)
 - CD: maksimipituus interpoloitavissa olevalle purskeelle on 13000 databittiä (8.7 mm datauran pituudessa)
- näytteitä joudutaan interpoloimaan kerran kymmenessä tunnissa, mikäli BER (bit error rate) on 10^{-4} → ei tule usein vastaan

3 Digitaalisen audio tallennusmuotoja

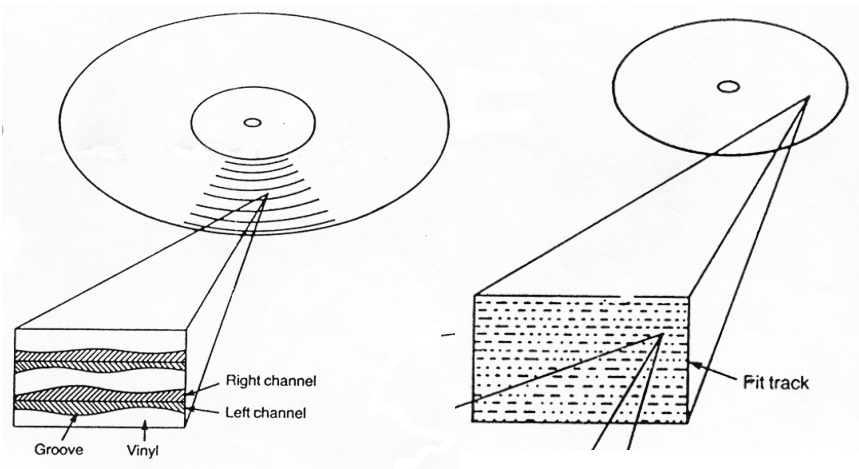
- Seuraavassa tarkastellaan joitakin digitaalisen audion tallennusmuotoja
 - CD-levy
 - DAT-nauha
 - MiniDisc
 - Digital compact cassette
 - DVD-levy
- Antavat käsityksen erinäisistä käytännöllisistä teknisistä ratkaisuista, joita tarvitaan audion tallentamisessa
- Lukuisia muitakin tallennusformaatteja on, mutta niiden läpikäyminen ei ole mielekästä
 - esimerkiksi levyformaatteja: CD-ROM, CD-Interactive, digital video interactive, CD-video, CD write once, magneto-optiset uudelleen kirjoitettavat CD:t, CD+graphics, CD+MIDI, CD-3

Digitaalisen audio tallennusmuotoja

- LP-levyistä puhuminen on historiaa, mutta antaa hyvää perspektiiviä CD-levyn ym. digitaalisten medioiden ominaisuuksien arviointiin
- LP-levy (engl. *long play*)
 - informaation tallennetaan analogisena urana
 - vaihtelu uran reunasta-reunaan amplitudissa ja syvyydessä edustaa alkuperäistä audiodataa
 - vasen ja oikea kanava on tallennettu uran eri reunoille
 - neulan mekaaniset liikkeet muunnetaan sähkösignaaliksi
- Ongelmia LP-levyjen kanssa
 - käsiteltävä varoen: uran vioittuminen kuuluu
 - SNR 60 dB, kanavaerotus 30 dB, taajuusvaste ei ole tasainen vaan tarvitaan ekvalisointia
 - mekaaninen neulan kuljetus aiheuttaa kuultavia artefaktoja, kuten huojuntaa
 - neula täytyy ajoittain vaihtaa
 - analogiset virtapiirit ikääntyvät ja aiheuttavat vaihesiirtoa

Digitaalisen audio tallennusmuotoja

- Kuva: LP-levy (vasemmalla), CD-levy (oikealla)



3.1 CD-levy

- CD-levy (compact disc, CD)
 - informaatio tallennetaan digitaalisesti
 - datakuoppien (engl. *data pits*) pituus kuvaa sarjaa ykkösiä ja nollia
 - molemmat audiokanavat tallennetaan samaan kuopparaitaan
 - tieto luetaan lasersäteellä
 - informaatiotiheys on noin 100 kertaa suurempi kuin LP-levyillä
- CD-levyn etuja
 - toimintavarma
 - ei kulu toistuvassa käytössä, koska luku tapahtuu lasersäteellä
 - virheenkorjaus käytössä
 - lukupään mekaaninen kuljetus tai levyn pyörimisnopeus ei vaikuta äänentoiston laatuun (ei esim. huojuntaa)
 - digitaalipiirit ovat immuunimpia vanhentumiselle ja lämpötilavaihteluille
 - SNR yli 90 dB
 - digitaalinen alikoodi: tekstiä näytölle, kontrollidataa, ja käyttäjän dataa

CD-levy Tallennusformaatti

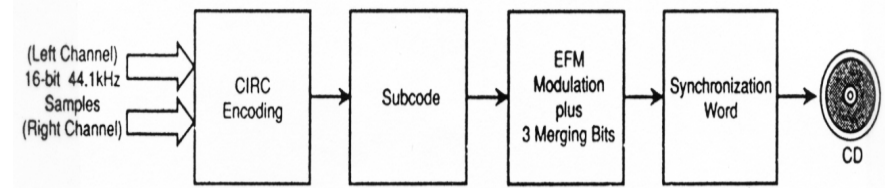
Audiotekniikkaa 13
DA / Klapuri

- CD-levyn audiosignaali
 - näytteistystaajuus 44.1 kHz
 - 10 % marginaali Nyquistin taajuuteen ajatellen 20 kHz kuuloaluetta
 - kvantisointi: 16-bittinen lineaarinen kvantisointi
 - teoreettinen SNR noin 98 dB maksimiampitudiselle sinisignaaliille
- Dataformaatti
 - *audion bittinopeus*: $44100 \times 16 \times 2 = 1.411$ Mbit/s
 - cross interleave Reed-Solomon virheenkorjauskoodi (CIRC)
 - *kokonaisdatanopeus* (audio, CIRC, sync, alikoodi): 2.034 Mbit/s
 - modulointi levyllä tapahtuvaa fyysistä kirjoittamista varten
 - 8:sta 14:ään modulointi (engl. *eighth-to-fourteen modulation, EFM*)
 - 8-bittinen data konvertoidaan modulaatiossa 14+3:ksi kanavabitiksi
 - *kanavabittinopeus*: $2.034 \times (17 / 8) = 4.322$ Mbit/s

CD-levy Tallennusformaatti

Audiotekniikkaa 14
DA / Klapuri

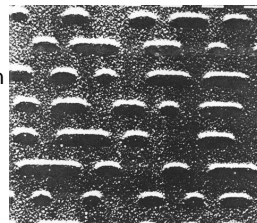
- Kuva: dataformaatin koostuminen kaaviokuvana



CD-levy Levyn fyysiset määreet

Audiotekniikkaa 15
DA / Klapuri

- Soittoaika korkeintaan 74.7 minuuttia
 - sivuhuomaus: data kirjoitetaan spiraaliin, jonka tiheydestä mahtuvan datan määrä riippuu. CD:n "red book"-standardi määrittelee tiheyden siten, että audiota mahtyy ym. määrä. Käyttäen tiheämpää uraa voidaan soittoaikaa melko turvallisesti venyttää n. 80 minuuttiin. Ei vältt. toimi kaikissa soittimissa.
- Levyn fyysisiä ominaisuuksia
 - yksipuolinen, läpimitta 120 mm, paksuus 1.2 mm
 - raidanleveys 1.6 μm , datakolot noin 0.5 μm leveitä
 - \uparrow älkää hyvät ihmiset opetelko tällaisia ulkoa!
 - levy pyörii myötöpäivään, signaali kirjoitetaan sisältä ulospäin
 - vakio lineaarinen lukunopeus maksimoi tallennustiheyden
 - pyörimisnopeus vaihtelee 200 – 500 kierrosta / min
 - datakolojen raja merkitsee ykköstä, ja kaikki välissä olevat alueet, kolossa tai sen ulkopuolella, ovat nolliä
 - kuva: datakoloja CD-levyllä



CD-levy Virheenkorjaus

Audiotekniikkaa 16
DA / Klapuri

- CD-järjestelmän tyypillinen virhetiheys on 10^{-5} , mikä vastaa 20 virhettä sekunnissa
- Noin 200 virhettä sekunnissa voidaan korjata
- Virhelähteitä
 - pöly, naarmut
 - sormenjäljet
 - kolojen epäsymmetrisyys
 - kuplat ja viat valmistusaineissa ja suojakerroksessa
 - "dropoutit" luvussa
- Virheenkorjauksen tavoitteita
 - hyvä virheenkorjauskyky sekä satunnaisille että purskevirheille
 - luotettava virheiden ilmaisu, vaikkei virhettä voitaisikaan korjata
 - pieni määrä redundanssia
 - CIRC täyttää nämä kriteerit

- Engl. *subcode*
- CIRC-enkoodauksen jälkeen jokaiseen kehukseen lisätään 8-bittinen alikoodisymboli
- Kahdeksan alikoodia merkitään P, Q, R, S, T, U, V, W
- CD-soitin kerää alikoodisymboleita 98:sta peräkkäisestä kehuksesta ja muodostaa niistä alikoodiblokin
 - alikoodiblokki: kahdeksan 98-bittistä sanaa
- Vain bittejä P ja Q käytetään audio-CD -levyissä
 - CD-ROM erottaa itsensä automaattisesti audio-CD:stä Q-alikoodin perusteella

3.2 DAT-nauha

- Engl. *digital audio tape (DAT)*
 - Ensimmäinen kuluttajille suunnattu järjestelmä, joka mahdollistaa digitaaliseen *tallennuksen* nauhalle
 - DAT tarjoaa suuren kaistanleveyden, jota tarvitaan digitaalisen audio tallentamiseen
 - Teknisen määrittelyn teki Electronic Industries Association of Japan (EIAJ)
 - työ alkoi 1981 ja saatiin lopulta valmiiksi 1987
 - Kaksi eri formaattia
 - pyörivän lukupään järjestelmä (engl. *rotary head DAT, R-DAT*)
 - stationäärisen lukupään järjestelmä (S-DAT)
- Kun R-DAT saatiin valmiiksi 1987, se tuli tunnetuksi vain nimellä DAT (S-DAT:n voi mielestäni unohtaa)

- Magneettinen media
- Pulssinkoodimoduloitua (PCM) dataa (= pakkaamatonta)
 - kaksi kanavaa
 - 32, 44.1 ja 48 kHz näytteistystaajuudet
 - 16-bittinen lineaarinen kvantisointi, tai 12-bittinen epälineaarinen kvantisointi
- Käyttäjä voi lukea ja kirjoittaa ei-audio informaatiota nauhan alikoodialueella
- Kaksinkertainen Reed-Solomon virheenkorjauskoodi
- Nauhalle kirjoitettaessa modulointi 8:sta 10:een bittiin
- DAT-nauhalle mahtuu tyypillisesti 2 tuntia ja jopa 4-6 tuntia audiota

- Pyörivä lukupää (engl. *rotary head*)
 - hidas lineaarinen nauhanopeus
 - mahdollistaa suhteellisen nopean haun
 - suuri kaistanleveys
 - ääniraidat sijaitsevat diagonaalisesti nauhaan nähden
 - DAT:n lukupäät sisältävä rumppu pyörii 2000 kierrosta / min
 - kaksi lukupäätä 180° toisista erillään
- Nauhan nopeus noin 8 mm/s
- Suhteellinen nauhanopeus 3 m/s
 - 2.2 Gbyteä informaatiota = 2 tuntia audiota
- Pyyhkiminen tapahtuu kirjoittamalla nauhalle uutta dataa
- Alikoodi voidaan lukea myös nopean haun aikana

Nauhan fyysiset määreet, datanopeudet

- Raidanleveys noin 14 μm , raitojen pituus noin 23 mm
- Datatiheys noin 18 Mbit/cm²
- Audion bittinopeus $48000 \times 16 \times 2 = 1.536 \text{ Mbit/s}$
- Kokonaisdatanopeus 2.77 Mbit/s (virheenkorjaus,alikoodi)

Virheenkorjaus

- Virheenkorjausta tarvitaan
 - nauha on jatkuvasti kosketuksissa pyörivän lukupään kanssa — tallennuksessa, toistossa, ja hakumoodissa
 - nauha on altis valmistusvirheille ja ympäristötekijöille, kuten lämpötilalle
- DAT on suunniteltu korjaamaan sekä satunnaisia että purskevirheitä
 - satunnaiset: ylikuuluminen vierekkäisten raitojen välillä, epätäydellisesti pyyhkiytynyt edellinen kirjoituskerta, mekaaninen epästabiilisuus
 - purskeet: dropoutit johtuen pölystä, naarmuista, ja liasta
- DAT virheenkorjauksen täytyy mahdollistaa muokkaus, joten dataa ei voi levittää monien raitojen yli
 - dataraita jaetaan vasempaan ja oikeaan kanavaan
 - kummankin kanavan data lomitetaan parillisiin ja parittomiin datablokkeihin
- Kaksinkertainen Reed-Solomon koodi: C1 – (32,28), C2 – (32, 26)

4 Häviöllistä koodausta käyttävät tallennusmuodot

- MiniDisc (MD)
- Digital compact cassette (DCC)
- Taustaa
 - musiikkiteollisuus ”tappoi” DAT:n, koska uskoi täydellisten kopioiden tekemisen mahdollisuuden käyvän heille kalliiksi
→ laitevalmistajat yrittivät kehittää jotain muuta
 - CD ei kyennyt kilpailemaan kasettien kanssa kannettavissa laitteissa
→ kysyntää kannettaville audiolaitteille
→ perusta Sonyn MD:n ja Philipsin DCC:n kehitysohjelmille

4.1 MiniDisc (MD)

- Sony toi markkinoille 1991
- Suunniteltu henkilökohtaisten kannettavien laitteiden markkinoille
- Signaali
 - kaksikanavainen digitaalinen ääni
 - näytteistystaajuus 44.1 kHz, 16-bittinen kvantisointi
 - kuulumalliin perustuva Adaptive transform acoustic coding (ATRAC)
 - viisinkertainen äänidatan pakkaus (1.4 Mbit/s → 280 kbit/s)
- ACIRC-virheenkorjauskoodi
- Elektroninen suojaus täräyksiltä (engl. *electronic shock protection*)
 - toteutettu 10–30 sekunnin muistipuskurilla → hyvä kannettavissa laitteissa
- Läpimitaltaan 64 mm levy
 - soittoaika 74 minuuttia
 - levyltä haku käy nopeasti
- Kaksi levyformaattia
 - valmiiksi kirjoitetut MD:t valmistetaan täsmälleen samoin kuin CD:t
 - kirjoitettavat MD:t käyttävät magneto-optista tallennusperiaatetta

MiniDisc (MD)

- Magneto-optinen (MO) tallennus ja optinen luku
 - MO-levyt voidaan kirjoittaa lukemattomia kertoja uudelleen
 - vrt. MD:n ”read only” formaatti, joka on valmistettu CD:n tavoin
- Hyödynnetään sekä optista että magneettista tekniikkaa
 - kirjoitettava kerros MO-levyillä tehdään magneettisesta materiaalista
 - lasersäde kuumentaa pienen alueen kirjoitettavaa kerrosta 180° Curien lämpötilaan, näin demagnetisoiden sen
 - kohdan jäähtyessä sitä pidetään polariteetiltaan 1:stä tai 0:aa vastaavassa magneettikentässä, ja kohta tulee näin kirjoitettua
- MD-soittimessa magneettinen lukupäätä ja lasersäde sijaitsevat levyn eri puolilla samalla kohdalla
 - pelkästään luettavat MD-levyt valmistetaan kuten CD:t, käyttäen datakoloja (data pits)
 - näitä levyjä luetaan lasersäteellä ja heijastus kertoo binäärikoodin

4.2 Digital compact cassette (DCC)

- Philips toi markkinoille 1991
- Suunniteltiin korvaamaan vanhat analogiset nauhat, ei kilpailemaan CD:n tai DAT:n kanssa
- Signaali
 - kaksikanavaista digitaalista ääntä
 - näytteistystaajuuudet 32, 44.1, 48 kHz
 - kuulomalliin perustuva Precision adaptive subband coding (PASC)
 - koodauksineen väitetään vastaavan 18-bittistä kvantisointia
 - subjektiivinen äänenlaatu lähes CD:n tasoa
- Virheenkorjaus: Reed-Solomon, tiedon lomitus kahdeksan raidan sekaan
 - PASC-ulostulon 768 kbit/s määrästä 50 % on redundanttia tietoa
- Nauhaformaatti
 - taaksepäin yhteensopiva vanhojen C-kasettien kanssa
 - vanhat soittimet osaavat soittaa, mutteivät tietenkään tallentaa
 - 8 digitaalista audioraitaa + 1 lisäinformaatiolle +2 analogisoittimille
 - sijaitsevat nauhan suuntaisesti

Digital compact cassette (DCC)

- Uusia toimintoja analogiseen kasettiin verrattuna
 - noin 400 merkkiä/s tekstiä toiston aikana
 - laulujen sanat, levyn oheistietoja, yksinkertaista grafiikkaa
 - kasetilla on sisällysluettelo
- Precision adaptive subband coding (PASC)
 - välttämätön, sillä kapean nauhan kaistanleveys ei riitä PCM-muotoisen audiodatan tallentamiseen sellaisenaan
 - virheenkorjauksen takia pitäisi vielä lisätä redundanssiakin
 - noin 100 kbit/s voidaan tallentaa luotettavaksi kullekin kahdeksasta vierekkäisestä raidasta (= 800 kbit/s kapasiteetti)
 - 768 kbit/s on standardoitu DCC:lle
 - 384 kbit/s itse audiodatalle
 - PASC vähentää datan määrän noin neljännekseen, ei siis kovin tiiviiksi

4.3 MD ja DCC

- Ei suunniteltukaan kilpailemaan CD:n / DAT:n kanssa
- Kilpail(e/i)vat keskenään
- Käytännössä MD on vetänyt pitemmän korren ja DCC kadonnut markkinoilta. Miksi?
 - MD: käytössä kulumaton media, nauha ei sitä ole
 - MD: nopea haku – miksi kelata nauhaa jollei ole pakko
 - MD: tärähdyksiltä suojaava järjestelmä
 - toisaalta DCC: hieman parempi äänenlaatu

4.4 DVD-levy

- Digital versatile disc (DVD)
- Ensimmäinen *digitaalisen videon* levitykseen tarkoitettu media
- Tallentaa 17 miljardia tavua dataa 120 mm levyille
 - yli 2 tuntia digitaalista videota ja audiota
 - yli 8 tuntia kaksipuoliselle, kaksikerroksiselle levyille
- Yhtäaikainen monen kielen tuki
 - 8 eri audioraitaa, jokaisella jopa 8 kanavaa
- Digitaalisuus antaa myös videolle uusia mahdollisuuksia
 - interaktiivisuus: valikoita yms.
 - tekstitykset ja elokuvan tiedot useilla eri kielillä
 - mahdollistaa "parental" kontrollin
 - jopa 9 eri kamerakulmaa, voidaan valita toiston aikana
 - mahdollistaa katselukertakohtaisen veloittamisen
 - läpinäkyvä videon haarautuminen eri juonenkuljetusten mukaan
 - nopea haku otsikon, luvun, tai aikakoodin perusteella
 - tukee laajakulmaelokuvia ja standardi-/laajakulmatelevisioita

DVD-levy

- MPEG-2 koodausta käytetään sekä kuvalle että äänelle
- DVD:n etuja
 - kuvan ja äänen laatu on hyvä
 - kestävä
 - ei altis magneettisille kentille tai lämmönvaihteluille
 - ei kulu käytössä
 - kooltaan kompakti
- DVD:n heikkouksia
 - ei voi soittaa takaperin
 - kuvan ja äänen koodaus voi tuottaa havaittavia artefaktoja
 - sisäänrakennettu kopioinnin suojaus ja aluekoodaus
 - valmistajien kannalta etu
 - koodien kiertäminen ei ole kovin vaikeaa

5 Digitaalinen radio

- Digital audio broadcasting (DAB)
 - Tausta
 - nykyiset FM-radiolähetykset VHF-kaistalla eivät voi tyydyttää tulevaisuuden tarpeita, joita ovat
 - erinomainen äänenlaatu
 - suuri kanavamäärä
 - pienet kannettavat vastaanottimet
 - laatu ei saa heiketä monitie-etenemisen tai signaalin häipymisen takia
 - nykyiset analogiset FM-radiojärjestelmät ovat saavuttaneet teknisen parantelun ylärajan
 - digitaalisella audiotekniikalla (CD, DAT, MD, jne) on joukko laatustandardeja, jotka ovat FM-radion saavuttamattomissa
 - kuuntelijat voivat ostaa parempaa laatua kuin FM-radio voi tarjota
- täytyi kehittää uusi digitaalinen radiojärjestelmä

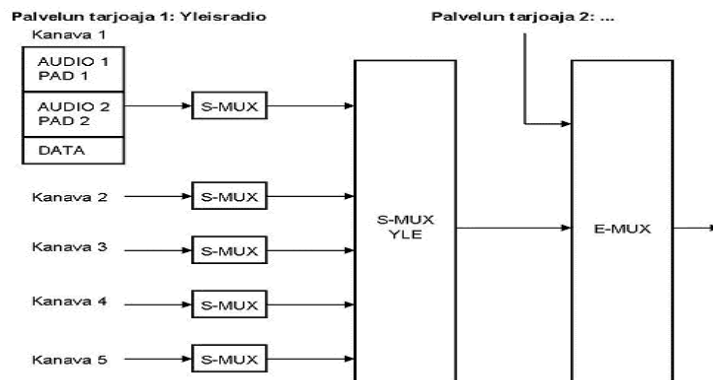
Digitaalinen radio

- Eureka projekti EU 147: DAB
 - yhteensä 530 miestyövuotta vuosina 1987-1994
 - osallistujia useista eri maista
 - tavoitteenasettelua, tutkimusta, kehitystä
- DAB – tehtävämäärittely ja vaatimuksia
 - korkealaatuinen digitaalinen tiedonsiirto
 - virheetön siirto, parempi äänenlaatu, tarvittava radiokaista minimiin
 - tulevaisuudessa monikanavaäänentoisto ja binääridatan siirto
 - uuden järjestelmän pitäisi riittää ainakin 50 vuotta → jätettävä paljon tilaa tulevalle kehitykselle
 - virheetön vastaanotto myös kannettaviin radioihin ilman erikoisantenneja
 - siirtokapasiteetti
 - ainakin 6 maanlaajuista stereokanavaa, sekä paikallisojelmia
 - riittävä siirtokapasiteetti lisäinformaatiolle
 - datakanavia lisäinformaatiolle: kontrollisignaali, ohjelman identifiointi yms.
 - järjestelmä dynamiikan kontrolliin
 - vastaanottaja valitsee haluamansa dynamiikan esim. koti-/autokuunteluun

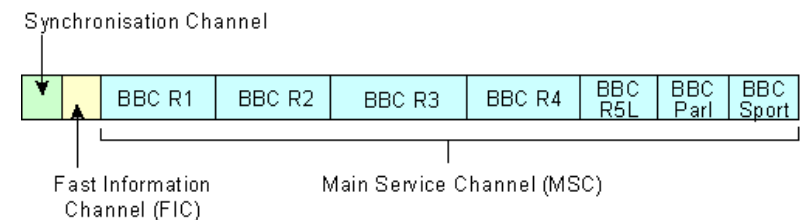
- DAB käyttää MUSICAM-audiokoodekkia
- Masking pattern adapted universal subband integrated coding and multiplexing (MUSICAM)
 - kuulumalliin perustuva audiokoodekki
 - käytännössä sama kuin MPEG-1 Layer 2 ja MPEG-2 BC Layer 2
 - 16 bittinen, 48 kHz näytteistetty ääni → 8 – 384 kbit/s
 - pakkaussuhde tyypillisesti 6:1 – 12:1 alkuperäiseen verrattuna
 - tukee näytteistystaajuuksia 24 ja 48 kHz
 - standardi jättää mahdollisuuksia jatkokehitykselle ja esim. kanavien määrän lisäämiselle

- Program associated data, PAD
 - vaihtelevan mittainen datakenttä 0–64 kbit/s
 - kulkee DAB-äänikehyksessä, joten synkronointi ääneen onnistuu
- PAD-lisäpalvelut voidaan jakaa kolmeen ryhmään
 - dynaaminen tekstipalvelu
 - perusta ensimmäisen vaiheen lisäpalveluille
 - soivan kappaleen esittäjä ja säveltäjä, tietoa tulevista ohjelmista, oopperan juoneen liittyvää selostusta, yms.
 - automaattinen kuvapalvelu
 - slide-show tyyppinen palvelu: vastaanotin voi ladata kuvia ja pyörittää niitä automaattisesti näytöllä
 - interaktiiviset palvelut
 - hyödynnetään nettisivuja
 - voidaan lähettää ohjelmiin liittyviä linkkejä nettisivuille → PC-vastaanotin ja opintoradiotoiminta

- Yhteen DAB-lähetyskanavaan mahtuu monta radiokanavaa ja niiden lisädata
 - kuva: radiokanavat ja lisädata yhdistetään samaan lähetyskanavaan multipleksaamalla [YLE:n Internet-sivut]



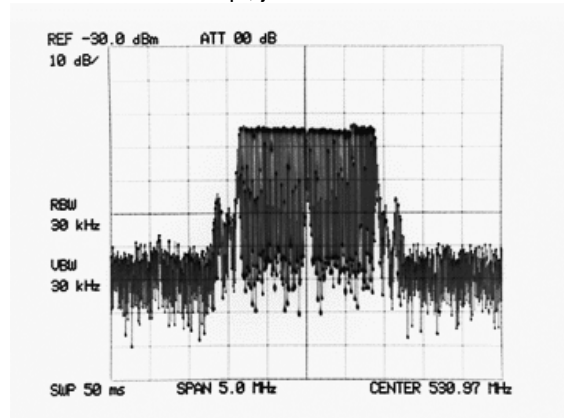
- Kuva: DAB-multipleksauksen kehysrakenne [BBC:n sivut]
 - synkronointikanava
 - nopea info-kanava: tietoa multipleksauksen konfiguraatiosta yms.
 - pääpalvelukanava
- Ennen bittivirran lähettämistä modulaattorille lisätään vielä virheenkorjauskoodi



Digitaalinen radio Modulointi

Audiotekniikkaa 37
DA / Klapuri

- DAB käyttää COFDM-modulaatiota
- Coded orthogonal frequency division multiplexing (COFDM)
 - yhden digitaalisesti moduloidun kanta-aallon sijasta käytetään montaa kanta-aaltoa, DAB:ssa maksimissaan 1536 kpl, jotka ovat 1 kHz etäisyydellä toisistaan
 - kuva: COFDM-moduloinnin kanta-aallot taajuustasossa [BBC sivut]



Digitaalinen radio Modulointi

Audiotekniikkaa 38
DA / Klapuri

- COFDM-moduloinnista vielä
 - jokaista kanta-aaltoa DQPSK-moduloidaan (differential quadrature phase shift keying, DQPSK)
 - multipleksin data on jaettu kanta-aaltojen kesken
 - kunkin kanta-aallon symbolinopeus on pienempi, mikä hieman suojaa kaikuja haittavaikutuksilta
 - ns. suoja-ajan (guard interval) aikana toistetaan osa jokaisesta symbolista → lisää toimintavarmuutta
 - matalampi lähetysteho kuin FM:ssä

Digitaalinen radio Yleisradion lähetykset

Audiotekniikkaa 39
DA / Klapuri

- YLE aloitti digitaaliradion koelähetykset 1994
 - 1998: ensimmäinen digikanava *Radio Peili* (asiapuheta, jazzia)
 - 2001: *Radio Aino, Radio Peili, Ylen Klassinen, Vega+, Yle World, Yle Mondo*
 - 2001: kuuluvuusalue Tre-Turku-Hki kolmio, noin puolet suomalaisista
 - 2002: digivastaanottimia äärimmäisen harvoilla, digi-TV:ssä tulee mukana

- Yle lähettää kaikki FM-kanavansa myös digitaalisena

- Kuva: YLE:n DAB-palvelu PC-vastaanottimen ruudulla [www.yle.fi/digiradio/]



Digitaalinen radio Käyttöönotto

Audiotekniikkaa 40
DA / Klapuri

- Suomessa digiradiovastaanottimia on kaupoista erittäin vaikea löytää, ja vielä harvempi on niitä ostanut
- Tekniikka on hyvä, mutta ei ole levinnyt kuluttajille
 - vastaanottimet ihan liian kalliita
- Analogiset radiolähetykset on tarkoitus lopettaa
 - Saksassa 2015, Suomessa samoihin aikoihin
 - Britit ovat olleet edelläkävijöitä digiradioon siirtymisessä, siellä lähetyksiä on jo jonkin verran enemmän
- Digitaalista radiota ei pidä sekoittaa RDS-järjestelmään, jolla voidaan lähettää tekstuaalista tietoa analogisen radiolähetyksen ohessa (kanavan nimi, mainoksia tms.)
 - RDS on melko laajalti käytössä uusissa analogisissa radiovastaanottimissa

6 Audio Internetissä

- Internet on tuonut uusia mahdollisuuksia
 - levyn voi julkaista Internetissä: nopea myydä ja helppo ostaa
 - live-konsertteja ja DAB-lähetyksiä voidaan välittää Internetissä
- Audio *streaming* Internetissä
 - tarkoittaa sitä, ettei tiettyä audiosignaalia tarvitse imuroida kokonaan ennen soittamisen aloittamista
 - kuuntelu alkaa heti, lataus jatkuu taustalla
 - dataa tulee puskuriin ja sitä soitetaan puskurin toisesta päästä
 - verkon ruuhkautuminen voi luonnollisesti katkaista toiston
- Vastaanottaja ajaa dekooderi-ohjelmaa
 - käytännössä laitteistoriippuva
 - myös dekooderi on tyypillisesti saatavilla Internetissä
 - dekooderin pitää hallita vaihtelevia viiveitä ja datan hukkumista

Audio Internetissä

6.1 Real-time transfer protocol (RTP)

- Ei liity mitenkään erityisesti audiodatan siirtoon
- Suunniteltu huolehtimaan reaaliaikaisuuden asettamista vaatimuksista Internetissä
- Protokolla liittää UDP/IP:n yli lähetettämiinsä datapaketteihin sarjanumerot, joten vastaanottaja kykenee konstruoimaan vastaanottamansa tietovirran oikeassa järjestyksessä
- Ei ota vastuuta verkon luotettavuudessa
- Paketteja voidaan lähettää useaan eri kohteeseen (multicast)
- Otsikkokenttä sisältää ajastusinformaation
- Tutkii ajallisesti onko joitain datapaketteja kadotettu

Audio Internetissä

6.2 Real audio

- Real audio
 - Real Networksin kehittämä tekniikka, jolla audiodataa voidaan soittaa lähetyksen aikana
 - real audio (.rm) on pakattua audiodataa
 - RealPlayer-dekooderiohjelma hankkii myös videodatan siirron
 - audion laatutasoa voi säädellä verkkoyhteyden mukaan
 - modeemi / kiinteälle yhteys, hyvinkin matalat bittinopeudet
 - data lähetetään paketteina, hyödynnetään RTP-protokollaa
 - alhaisen tason siirtomenetelmä ei *takaa* paketin menemistä perille
- Real audion toiminta
 1. käyttäjä klikkaa .ram-linkkiä, ja lataa sen selaimensa
 2. selain käynnistää RealPlayerin
 3. RealPlayer pyytää .ram-tiedoston sisältöä palvelimelta
 4. mikäli palvelin tarjoaa eri kaistanleveyksiä, RealPlayer arvioi vaihtoehdot ja lähettää sitten pyynnön palvelimelle

Audio Internetissä

6.3 Liquid Audio

- Liquid Audio
 - Internetissä siirrettävän CD-laatuisen äänen pioneeri
 - suojelee tekijänoikeuksia kontrolloimalla jakelua
- Liquid Audio (LA) on palvelujen tuottaja, joka pyrkii mahdollistamaan CD-laatuisen musiikin levityksen Internetin välityksellä
 - musiikkiteollisuuden myötävaikutuksella yhtiöllä tietyllä tavalla johtava asema vakiinnutettaessa Internetiä uudeksi musiikin jakomediaksi
 - tuotteet ja palvelut perustuvat avoimelle arkkitehtuurille, joka tukee monia formaatteja (AAC, MPEG-1 Layer 3, Dolby AC-3)
 - LA tarjoaa musikoille mahdollisuutta myydä musiikkiaan Internetin kautta
 - nopea, helppo, turvallinen tie esitellä ja myydä musiikkia

- Liquid Audion ratkaisu piratismiin estämiseen audion vesileimauksen avulla
 - kun joku ostaa kappaleen, ostajan henkilötiedot lähetetään LA:n tietokoneelle
 - ennenkuin kappale lähetetään Internetin kautta ostajan tietokoneelle, ostajan henkilötiedot kryptataan ja kätketään musiikkitiedoston sisään
 - henkilötieto siirtyy kopioitaessa musiikkitiedoston mukana
 - mikäli ostaja luo ja levittää monia CD-kopioita, tarvitsee vain saada yksi kopio käsiinsä ja lähettää se LA:lle
 - LA voi irrottaa vesileiman, purkaa salauksen, ja näin saadaan selville kuka oli kyseisen musiikkitiedoston ensimmäinen lataaja

7 Audion vesileimaus

- Digitaalinen vesileima
 - identifiointikoodi, joka on pysyvästi upotettu itse tiedon sekaan
 - tekijänoikeuksien suojaus ja tiedon autentikointi
 - voidaan pistää esim. kuva-, ääni-, ja videodataan
- Miksi vesileimata? Koska digitaalinen esitysmuoto
 - tekee kopioimisen helpoksi ja halvaksi
 - mahdollistaa alkuperäisen kanssa identtisten kopioiden luomisen
 - tekee kopioiden levittämisen helpoksi ja nopeaksi
 - vesileimalla varmistetaan tiedon alkuperä, turvallisuus, oikeellisuus, tekijänoikeudet, tai sisällön koskemattomuus / etäisyys alkuperäisestä
- Steganografia ≠ kryptografia
 - vesileimausta ei pidä sotkea kryptografiaan
 - *steganografia*: ideana välittää tietoa huomaamattomasti toisen aineiston sisällä, itse aineisto julkista, kreik. *steganos* (peitetty), *graphie* (kirjoitus)
 - *kryptografia*: muutetaan koko aineisto sellaiseen muotoon, etteivät ulkopuoliset saa siitä mitään järkevää tietoa irti

Audion vesileimaus

7.1 Vaatimuksia digitaaliselle vesileimalle

- Millainen vesileima on hyvä?
 - läpinäkyvyys
 - robustisuus hyökkäyksille
 - informaation välityskapasiteetti
- Ratkaisun vaatimukset
 - ulkopuolinen ei voi luoda eikä poistaa vesileimaa
 - vesileima on itse aineistossa eikä oheisinformaationa
 - alkuperäisen aineiston laatu ei saisi heiketä vesileimauksessa
 - toisaalta hyökkäysyrityksien täytyisi heikentää laatua mahd. paljon
 - vesileima ei ole helposti havaittavissa → johtaisi hyökkäysyrityksiin
 - vesileima on robusti alkuperäiseen aineistoon kohdistuvalle tahalliseen tai tahattomalle manipuloinnille, ja hyökkäysyrityksille
 - AD/DA-muunnokset, kohina, pakkaaminen, suodatus jne

Audion vesileimaus

7.2 Digitaaliset vesileimat audiosignaaleissa

Joitain esimerkkejä vesileiman piilottamisesta:

- Viestin koodaaminen vähiten merkitseviin bitteihin
 - +: helppo vesileimata, -: helppo löytää, kohinaominaisuudet eivät hallinnassa
 - herkkä kaikelle signaalin muokkaamiselle, redundanssia lisäämällä paranee
- Direct-sequence spread spectrum –menetelmä
 - viesti koodataan siten, että se leviää koko taajuuskaistalle (→ ei kuulu pahasti)
 - binäärinen viesti moduloi pseudo-random kohinaa
 - vaikka osa taajuuskaistasta muuttuu, viesti on edelleen luettavissa
 - koodi on herkkä ajoitusvirheille, vesileiman etsinnässä pitää synkronoitua
- Vaihekodeaus
 - viesti lisätään signaaliin muuttamalla taajuuskomponenttien vaihekulmaa
 - kuulo ei ole herkkä absoluuttisille vaiheeroille, vain vaiheen muutoksille
 - heikkous: jos tietää menetelmää käytetyn, vaiheinformaatio on helppo sotkea
- Kaiun piilotus
 - audiosignaaliin lisätään keinotekoisia kaituja, joita ihminen ei huomaa
 - kaiut havaitaan, mutta jos ne vastaavat huonetilan kaituja, eivät häiritse
 - koodaus voidaan määritellä neljällä parametrilla: kaitujen amplitudi ja vaimennus, sekä omat kaituviiveensä ykkösille ja nolille

7.3 Hyökkäyksiä vesileiman tuhoamiseksi

- Jittering
 - jaetaan signaali lohkoihin, joista toisia lyhennetään yhdellä näytteellä, toisia pidennetään yhdellä näytteellä
 - vesileimaa etsivän ohjelman synkronointi menee pieleen
- Signaalin keston muuttaminen tai uudelleennäytteistys
- Hyökkäys kaiun kätentää vastaan
 - yritetään estimoida käytetyn koodauksen parametreja, ja sitten käänteissuodatetaan signaali
- Protokollahyökkäys
 - ei hyökätä varsinaista vesileimaa vaan kokonaisjärjestelmää vastaan
 - vesileimausprosessi on usein additiivinen tai ainakin vaihdannainen
 - lisätään oma vesileima jo leimattuun dataan ja väitetään että oma leima on lisätty ensin
- Keskiarvottaminen (mikäli samaa dataa saatavilla eri vesileimoilla)
- Häviöllinen pakkaus
 - kompressiomenetelmät poistavat signaalista juuri niitä komponentteja, joihin tieto voitaisiin upottaa sen kuulumatta

8 Digitaaliset audioliitännät

- On tärkeää, että audiolaitteet voivat kommunikoida keskenään digitaalisesti, jottei digitaalisuuden etuja menetetä siirrossa
 - tallentavat ja toistavat laitteet
 - ääntä käsittelevät laitteet
 - miksauskonsolit
 - tarvitaan standardoitu rajapinta laitteiden väliselle tiedonsiirrolle
- Digitaaliliitännät ovat kompleksisempia kuin analogiset
 - näytteistystaajuus, kvantisoinnin sananpituus, kontrolli, synkronointi, koodaus → täytyy tarkalleen määritellä
- Useat yhtiöt ja organisaatiot ovat standardoineet omia liitännöjään
- Laajemmin käytössä olevia standardeja ovat ainakin
 - AES3 (toiselta nimeltään AES/EBU)
 - Audio Engineering Society (AES), European Broadcasting Union (EBU)
 - AES10 (multichannel audio digital interface, MAD1)
 - S/P DIF (Sony/Philips digital interface)

8.1 Vaatimuksia rajapinnoille

- Ajastus
 - synkronointi / kellosignaali hoidettava jollain tavalla
- Eri signaaliformaatit
 - tuettava useita eri näytteistystaajuuksia
 - hallittava erilaisia kvantisoinnin sananpituuksia
- Useiden audiokanavien siirto
 - = siirtyy suuria määriä dataa
 - lisäksi kontrolli-informaation mahdollisuus
- Toimintavarma tiedonsiirto eri medioita käyttäen
 - pitkät kaapelit, myös optiset kaapelit
 - vain yhtä kaapelia käytetään useillekin audiokanaville