

A CD-játszók titkai

Komáromi Zsombor

A világon ma már több milliárdra teszik a használatban lévő lejátszók és CD-ROM olvasók számát. Írásunk technikai részével arra szeretnénk rávilágítani, hogy egy digitális rendszerben mi befolyásolhatja a hangminőséget, és hogy a gyártók hogyan aknázták ki mindazokat a lehetőségeket (sőt még annál is többet), melyeket a CD lemezekben rejtenek.

A Compact Disc-nek vagyis a kompakt lemeznek már az elnevezése is arra utal, hogy itt egy kisebb, és egyszerűbben kezelhető formátumról van szó, mint a korábbi fekete lemezek. Indulását hatalmas érdeklődés előzte meg. Egy olyan rendszer, amely műszaki paramétereit tekintve olykor nagyságrendekkel "ráver" a korábbi hangrögzítő és visszaadó berendezésekre, biztos, hogy forradalmasítja a hangtechnika világát - gondolta mindenki. Ez így is lett, bár mint a forradalmak eredményével általában, az emberek most sem voltak mind elégedettek. Ha a lemezek korábbi evolúcióját végigszemléljük, a fejlődés hozott előnyök mindig egyértelműek voltak. Fonográf lemezből 78-as, 78-as lemezből mikrobarázdás - a hangminőség és a műszaki paraméterek folyamatosan javultak. A CD lemez titkolt ígérete az volt, hogy ugyanilyen hangminőségben javulást hoz a régebbi rendszer összes problémájának eltörlésével együtt. Ezt sugallta a reklámszlogen is: "Tökéletes hangminőség - örökre."

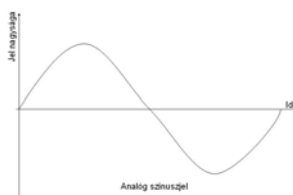
Érdekes ma végigolvasni azokat az írásokat, amelyek az első CD lemezek meghallgatása utáni véleményeket közlik. Az emberek két végletes véleményre ragadtatták magukat. Az egyik felük azt vallotta, amit a forgalmazó cégek is állítottak, hogy végre itt van minden rendszerek legjobbika, a tökéletes hangzás. A másik csoport viszont nemhogy nem volt lenyűgözve az eredménytől, de kijelentette, hogy a régebbi rendszer sokkal szebben szólt. Néhányan mintha emlegették volna a túlzott sterilitást és a zavaró zajmentességet, de valójában a gond az aggasztóan kis dinamikával, a fátyolos hangzással, és globálisan azzal volt, hogy egyszerűen a legtöbb embernek jobban tetszett a régi, amelynek hibáit "sikerült kiküszöbölni".

Keresni kezdték az okokat. Többen a hangmérnököket okolták, mondván, hogy az új felvételi eljárások az ő hibáikat tükrözik. Ez az elgondolás logikátlannak tűnik, mert hogy lehet az, hogy egy alapvetően gyengébb műszaki jellemzőkkel rendelkező analóg rendszer a hibákat elfedte, viszont a jó hangzást átengedte magán? És fordítva, egy műszakilag jobb rendszer a hibákból enged át többet, és a hangminőségből kevesebbet? Mások a digitális átalakítók kiforrotlan-ságáról beszéltek. Voltak, akik az analóg kimeneti szűrőkben vélték megtalálni a ludast. Voltak, akik a még kiforrotlan digitális stúdiótechnikát hibáztatták. Ebben már inkább lehetett valami, hiszen az első digitális felvételi eljárással készült de még fekete lemezen kiadott zeneművek tán még a CD lemeznél is csapnivalóbbak voltak. (A régebbi műszakilag kevésbé korrekt rendszer átengedte az új, jó rendszer hibáit?) Tény és való, hogy a nyolcvanas évek elejéről származó DDD-s CD lemezek a rossz hangzás jó néhány mintapéldányát produkáltak. Akkoriban azonban az új technológiára nem vetett volna jó fényt, ha a régi tökéletes analóg felvételeket adták volna ki a "tökéletes hangú" CD lemezekben.

Tizenegynéhány év távlatából szemlélve talán kijelenthetjük, mindenkinek volt (egy kis) igaza. Semmi sem volt tökéletes (még ma sem az). A problémát talán az jelentette, hogy a világszerte bevezetett elsőpró kampányhadjárat és a relatíve magas ár nem állt szemben azzal, amit az akkori közönség a hírverés hallatán várt, és amit az akkori már több mint húszéves fekete hanglemez technika kiforrottsága produkálni tudott. Sokan megfeledkeztek arról a tényről, hogy itt minden korábbi (analóg) rendszertől alapvetően eltérő új (digitális) rendszer lépett életbe. A digitális technika ma tart ott, mint amikor a fonográfól a 78-as lemezekre tértünk át a század első felében, ugyanis az első generációs CD lemezeket lassan fel fogja váltani egy (remélhetően) egyértelműen jobb digitális formátum, legyen az DVD Audio vagy Super Audio CD. Mára mindenestre mindennapi életünk szerves részévé vált, számítástechnikai adathordozóként, hordozható berendezések elemeként, autóban, "sétáló" kivitelben. A CD lemezjátszó megtalálható a konyhában, a dolgozószobákban, és a High-End termékek között is.

Mi is a digitális technika?

Bár mindennapi életünk szerves részévé vált, és technikailag is sokat fejlődött indulása óta, a legtöbb ember szinte semmit nem tud arról, hogyan működnek a CD lejátszók, sőt arról sem, hogy mitől is digitális ez az egész. Ha például Önnek feltennék a kérdést, hogy mi is az a "digitális", mit válaszolna rá? Azt, hogy kettős számrendszerben lévő? Azt, hogy kiváló minőségű? Azt, hogy jobb, mint az analóg? Azt, hogy diszkrét mintákra bontott? A megkérdezett emberek java része hasonlókat szokott felelni. Valójában ezek a válaszok nem a kérdésre felelnek, hiszen nem azt mondják meg, hogy mi, hanem hogy milyen.



Mi tehát a digitális? Ahhoz, hogy megértsük, állítsuk szembe az analóggal. Az analóg szó maga hasonlóságot jelent. A levegőben terjedő hanghullámot (amelynek frekvenciája, vagyis a váltakozás gyakorisága és amplitúdója, vagyis kiterésének nagysága folyamatosan változik, (1. ábra) egy mikrofonnal hozzá "hasonlóan" változó elektromos jellel alakítjuk át. A mikrofon jelét egy erősítővel egy hozzá "hasonlóan" változó nagyobb jellel alakítjuk (felerősítjük), majd azt egy mágnesszalagon "hasonlóan" változó mágneses jelként rögzítjük. Ez egy analóg átviteli lánc működési elve. Azt, hogy mennyire jó

rendszerünk minősége, az határozza meg, hogy az átalakítás, tárolás, lejátszás után a jel mennyire "hasonlít" az eredetire. Mindennapi életünkben is tudhatjuk, hogy hogyan jelennek meg egy analóg átviteli lánc hibái a megszólaló hangban. Készítsünk felvételt, például egy kazettás magnóra. A felvétel zajos lesz. A készülék műszaki mérései közül ezt az adatot a jel-zaj viszony mutatja (a maximális hasznos jel és a rendszer zajának aránya). Ha nagyon kivezéreljük, torzítani kezd. Ez a torzítás. Kevesebb magas-, és mélyhangot hallhatunk vissza, mint az eredetiből. Ez a rendszer linearitása, illetve frekvencia-visszaadásának függvénye. Ha közvetlenül mikrofonról veszünk fel, problémát jelenthet,

hogy amennyiben a közvetlenül a mikrofon mellett lévő erősebb hangforráshoz igazítjuk a felvétel szintjét, akkor nem hallatszanak a halk részletek, ha a halk részletekre állítjuk be a szintet, akkor a magnó túlvezérlődik. Ez a dinamika problémája: a rendszer nem képes visszaadni a leghalkabb és leghangosabb jel között eredetileg fennálló különbséget.

Maga a digit számot jelent, a latin digitus, azaz ujj szóból ered. A digitális pedig számszerűsítettséget. A digitális jel úgy jön létre, ha a folyamatosan változó jelet meghatározott sűrűséggel megmérjük, és a mérés eredményét rögzítjük. A mérés eredménye numerikusan, vagyis számszerűen kifejezhető. A számszerű kifejezés történhet bármely számrendszerben. A kettes számrendszer technikai szempontból azért felel meg leginkább erre a célra, mert így egyrészt csak két különböző állapotot kell egymástól megkülönböztetnünk és tárolnunk, az egyet és a nullát, másrészt a digitalizált jellel való matematikai műveletvégzések, kódolások, hibajavítások, moduláció így sokkal könnyebben elvégezhető.

A két rendszer egymás mellett élésére természetesen nem csak a hangtechnikai rögzítésben találhatunk példákat. Mindennapi életünkben bármilyen olyan berendezés, amely mér valamit (mérőműszerek, sebességmérők, órák, számlálók, hőmérők, vér-nyomásmérő, stb.) lehetnek digitálisak vagy analógok. Ha túlságosan le akarnám egyszerűsíteni a helyzetet, akkor azt mondhatnám, hogy ami számmal jelez ki, az digitális, ami mutatóval, az analóg. (Ez utóbbira a szabályt erősítő kivétel az óra). Használati tárgyaink és szórakoztató elektronikai berendezéseink - tetszik vagy nem - lassan digitá-lissá válnak.

A digitális technika elméleti alapjait a negyvenes években fektették le. A gyakorlati megvalósulás az ötvenes évek végén kezdődött, nagy távolságra történő adatátvitel célját szolgálták. Ekkor dolgozták ki a mai CD technika alapjául szolgáló PCM (Pulse-Code-Modulation, azaz impulzuskód-moduláció) eljárást. A PCM jel egy olyan négyesjegy, ahol a négyesjegy magasabb feszültségnek megfelelő értéke felel meg a bináris 1-nek, a kisebb feszültségérték pedig a 0-nak. A négyesjegy hossza aszerint változik, hogy hány nulla és egyes követi egymást. A PCM jel lehet soros vagy párhuzamos. Soros jelről beszélünk akkor, ha egy szóban elhelyezkedő biteket egymás után egy kábelen visszük át. Párhuzamos a jel akkor, ha bitenként vagy byte-onként egy csatornát alkalmazva egyszerre visszük át a kódszavak összetevőit. Egy 16 bites rendszerben ilyenkor természetesen 16 csatornára van szükség.

A hetvenes évekre a stúdiókban használt videomagnók technikai színvonala annyira kiforrott, hogy lehetségessé váltak digitalizált hangrögzítésre. Az eljárás alapját egy digitalizáló PCM kódoló képezte, melynek kimenetén a digitális jelet úgy kódolták, hogy azt a videomagnók PAL vagy NTSC videojékként tudják rögzíteni.

Miért volt szükség videomagnók használatára? Az analóg jel átvitelére és tárolására megfelelnek olyan eszközök, melyeknek sávszélessége az emberi hallás fiziológiájához illeszkedően 20 Hz-től 20 kHz-ig terjed. A digitalizálás után létrejött jel sávszélessége azonban több mint 4 MHz, tárolására tehát csak olyan rögzítőeszköz felel meg, amely sávszélességét tekintve akár videojel felvételére is alkalmas. A PCM kódoló kifejlesztése és előállítására költséges és rendkívül munkaigényes feladat volt, ráadásul az integrált áramköri technika magas fejlettségi színvonalát feltételezte. Milyen előnyöket biztosít hát a digitális hangtechnika, ha mindezen nehézségek ellenére érdemes volt áttérni rá?

A digitális technika előnyei és hátrányai

A leglényegesebb, hogy a felvett hanganyag minőségromlás nélkül másolható, tárolható, valamint tetszőleges példányszámban sokszorosítható, ugyanis az átvitel és tárolás során nem lép fel torzulás, jelcsökkenés, átmágneseződés. Emellett sokkal jobb műszaki paraméterekkel rendelkezik. Egyrészt lényegesen jobb a jel-zaj aránya, mint az analóg rendszereké. Ennek megfelelően kihasználható dinamikatartománya is nagyobb, akár az analóg rendszerek ezerszerese is lehet. A jelhordozók és a berendezések érzéketlenek a hőmérséklet és feszültség-ingadozásokkal szemben. Nincs hangmagasság-ingadozás. A digitális rendszer képes az egyenfeszültségű jelkomponensek átvitelére is, frekvenciamenete teljesen lineáris.

A fentiek után érthető, miért volt annyira fontos, hogy a hangrögzítő stúdiók világában minél előbb át tudjanak térni a digitális rendszerekre. A mindennapi életből azonban tudhatjuk, hogy mindennek megvan a maga árnyoldala is (vagy ha nincs, akkor nagyon drága). Milyen hátrányai vannak a digitalizálásnak?

A digitális jel érzékeny az adatvesztésre. Már néhány bit elvesztése az eredeti jel re-produkálhatatlanságát jelenti. A probléma kiküszöbölése jelentős hardver és szoftverráfordítást igényel. A digitális átvitel céljául szolgáló áramkörök rendkívül bonyolultak és összetettek, kifejlesztésük és gyártásuk a tömegtermelés kialakulásáig meglehetősen drága. A digitális jelfeldolgozó áramkörök túlvezérlése a teljes hangfrekvenciás jel összeomlásához vezet. A szerkesztési funkciók ellátása digitális rendszerben mechanikusan nem végezhető el, elektronikus snittkészítő berendezésekre van szükség. Az analóg rendszereknél a mérhető műszaki adatokat és a hangminőséget meghatározó tényezők általában az alkalmazott kapcsolástechnikától és a felhasznált alkatrészek minőségétől függenek. De alapvetően mi határozza meg a digitális rendszerek minőségét?

Az egyik az, hogy az eredeti, folyamatosan változó jelből milyen sűrűséggel vesznek mintát. Ez az ún. mintavételi frekvencia, ez határozza meg az átvihető legmagasabb frekvenciát. Ugyanis a mintavételezési frekvenciának maximálisan a fele lehet az eredeti hangjel legmagasabb frekvenciájú komponense. A másik lényeges paraméter, hogy a kapott minták átalakítása során hány különböző nagyságú jelet tudunk egymástól megkülönböztetni. Ez a rendszer felbontása, ez határozza meg, hogy mekkora lesz a jel-zaj aránya, a dinamika és a torzítás. Hogy ez utóbbit jobban megérthessük, képzeljük el, hogy meg akarjuk mérni szobánk egyik falának hosszát. Ha a mérőszalagon, amelyet használunk csak a métereket jelölték meg, akkor a kapott eredményt méterre kell kerekítenünk. Adott esetben a négyes és az ötös osztás között van a fal hossza, tehát megállapíthatjuk: 4 vagy 5 méter hosszú. Ha a szalagon feltüntették a deciméteres felosztást is, akkor pontosabb eredményt kapunk, illetve a kerekítésnél keletkezett hiba kisebb: 4,4 és 4,5 méter közé esik. Ha a centiméterek is rajta vannak, akkor az eredmény 4,46 és 4,47 méter közé esik, és a fal hosszához mérten alig valamiképp kellett kerekítenünk. A kerekítéskor "leeső" távolság (a mérés hibája) a kvantálási hiba.

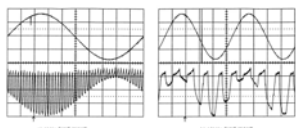
A számokra tekintve láthatjuk, hogy ha egy helyi érték áll rendelkezésünkre a tízes számrendszerben (tízujjú létünkre mi emberek ezt használjuk), akkor tíz különböző hosszúságot tudok megkülönböztetni. A mérőszalag beosztásának finomítása a számok hosszának (helyi értékeknek) növekedését jelenti. Egy helyi érték növekedés tízszeresére növeli a pontosságot. Logikusan, ha kettes számrendszerben tárolunk adatokat, akkor egy helyi értékkel való növekedés (egy bittel több) kétszeresére növeli a pontosságot.

A digitális rendszereknél általában lineáris kvantálást végeznek. Ez azt jelenti, hogy a jel nagyságok, amelyekre a kerekítést elvégzik, vagyis amelyek az analóg jel pillanatnyi nagyságát megfeleltetik, mindig egyforma nagysággal (monoton) nőnek. Fenti példánkban teljesen természetesnek vettük, hogy szobánk falának megmérése olyan mérőszalagot használunk, amelynek beosztása teljesen egyenes. Ha a hibaarányt százalékosan fejezzük ki, észrevehetjük, hogy a mérés hibája a mért hosszal változik. Vegyünk egy kézzel fogható példát. Tételezzük fel, hogy van egy 200 m hosszú mérőszalagunk egy méteres beosztással. Ha szobánk falát mérjük vele, akkor a leképzési hiba a mért eredményhez képest 20-25 %. Ha egy sportcsarnok hosszát mérjük meg, akkor a valós 104,57 méterhez képest a kerekítési hibánk kisebb lesz, mint 0,5 %.

Erre mondhatnánk azt, hogy nincs ezzel semmi gond, hiszen nem a halk jeleknek van jelentősége, mert azok úgymint eltűnnek a környezeti zajban. A hangtechnikánál azonban figyelembe kell venni, hogy az emberi hallás érzékenysége logaritmikusan növekvő görbével írható le. Ez azt jelenti, hogy a halk hangok között sokkal kisebb különbségeket vagyunk képesek meghallani, mint nagyobb hangerőnél. Vegyünk egy konkrét példát. Ha zenét hallgatunk otthon 0,1 watt hangerővel, és a zenét felhangosítjuk 0,2 wattra, akkor kétszer olyan hangosnak halljuk. Ha viszont 1 watt teljesítménnyel hallgatjuk a zenét, és 1,1 wattra hangosítjuk fel, akkor szinte észre sem vesszük a különbséget. Ugyanakkora hangerő-növekedéshez itt már 1 wattra van szükség. Ha a fület akarnánk utánozni, olyan mérőszalagra lenne szükség, ahol a kisebb jelek tartományában a beosztás egyre sűrűbb.

Lineáris kvantálás esetén a hangos részeknél alig lesz torzítás, mert az emberi fül léptékeihez képest nagyon kis lépcsőket használtak a leképzésre. Az alacsony jelszinteken viszont durva leképzési hibákat tapasztalhatunk. Az analóg rendszerek általában pont fordítva viselkednek: a kisebb jelek tartományában kisebb a torzítás. Kivétel ott is van, például a B osztályú erősítők nullát-meneti torzítása. Ha digitális rendszerünk felbontása jó, akkor ezzel nincs gond, de ha kevés leképzési szint áll rendelkezésre, komoly gondot jelenthet.

A digitális rendszerek hangminőségében kételkedők véleményét éppen a lineáris kvantálás támaszthatja alá. A fül ugyanis "természetesebbnek" találhatja, hogy a torzítás a kivezérléssel egyenes arányban nőjön, nem pedig fordítva. Mekkora kell lennie egy digitális rendszer felbontásának? Egy kompromisszummentes audió lánc átvitelének illeszkednie kell az emberi hallás fiziológiájához. Az emberi fül által még hallható legkisebb zajhoz képest a fájdalomhatár körülbelül 120 dB távolságra helyezkedik el. Ez 1 : 1.000.000 vagyis egy az egymillióhoz arányt jelent. Ezen túl elvben nem érdemes növelni egy rendszer felbontását. Kettes számrendszerben ekkora dinamika eléréséhez 20 bitre van szükség. A digitális technikában ugyanis jó közelítéssel egy helyi érték, vagyis egy bit 6 dB-nek felel meg (kétszeres értéknek). Az alkalmazott bitek számát a szóhosszúság adja meg.



Az átviteli igények meghatározásának másik kulcseleme a változás gyakoriságára (frekvencia) vonatkozik. (2. ábra) A fül ugyanis a különböző frekvenciákat is meg tudja különböztetni egymástól. Egy olyan rendszer, amely (nagyjából) tökéletesnek mondható, torzításmentesen át kell eressze magán a 20 Hz-20 kHz-es hangfrekvenciás sávot. Ehhez elméletileg minimálisan 40 kHz-es mintavételezésre van szükség, a gyakorlatban pontosan

44,1 kHz-re választották. A mintavételezés és az adatátvitelben alkalmazott szavak hossza adja meg az úgynevezett információ sűrűséget, vagyis azt, hogy egy másodperc alatt mekkora adatmennyiséget kell továbbítanunk. Ez a fenti két példát nézve: $44100 \times 20 = 882.000$ bit/s. A fent már említett adatvesztési érzékenység miatt azonban hibajavító és más információ bitszámokra is szükség van. Belátható, hogy a minőség ára a lényegesen megnövekedett sáv szélesség igény lett. Ekkora felbontást és sebességet a nyolcvanas évek elején a technika még nem tudott biztosítani. A Philips elegendőnek találta volna a 14 bites felbontást, a Sony azonban a stúdiókban alkalmazott PCM kódolóival szerzett tapasztalatai alapján ragaszkodott a 16 bithez. A CD lemezek végleges specifikációja tehát 44,1 kHz mintavételezés, 16 bit felbontás lett.

A CD rendszer létrehozása és alapvető jellemzői

A CD rendszer kifejlesztésére történő első lépések 1974-ben történtek meg. Ekkor kezdődtek meg az optikai letapogatással kapcsolatos első kísérletek a Philips-nél. 1979-ben a Sony is bekapcsolódott a munkálatokba. A kísérletek első eredménye a Laser-Vision képlemez volt. Erre a képzelet még nem digitálisan tárolták, hanem analóg jelként. A Sony-Philips által javasolt végleges CD szabvány 1980 táján látott napvilágot. Az első valóban digitális CD lemezjátszó prototípusokat is ebben az évben mutatták be a nyilvánosságnak.

A CD lényegében egy 12 cm átmérőjű műanyag lemez, amelyen spirál mentén tárolódik az információ. A spirális sávban az információ belülről kifelé rögzített, vagyis pont ellenkezője a bakelit lemezekének. Az információt parányi bemélyedések, az ún. pitek hordozzák. A pithosszúság, valamint az egyes pitek közötti távolság soros digitális kódot képez, ami végeredményben a tárolt információt reprezentálja.

Egy CD-n maximálisan 99 zeneszám tárolható. A digitalizált zenei információ mellett azonban további információk is találhatóak a CD lemezeken. A pítávban alkalmazott időosztásos eljárás segítségével minden zeneszám startidejét és a zeneszám időtartamát is rögzítik. Az időosztásos eljárás (időkódolás) teszi lehetővé azt is, hogy a 99 zeneszám mindegyike 99 szakaszra legyen felosztható (indexelés). Ennek előnye, hogy az ily módon megjelölt szakaszok külön-külön is elérhetők.

Ezen túlmenően a zeneszámokkal kapcsolatos időadatok, valamint a zenei felvételek száma egyfajta tartalomjegyzék formájában is rögzítve van a pitsáv elején. Ezt a tartalomjegyzéket a CD rendszerben TOC-nak (Table of Content) nevezik. A CD lemeztároló vezérlőrendszere a CD minden betöltésekor, ill. minden indításkor betölti a tartalomjegyzéket egy számlálóáramkörbe. Az említett információk mellett a TOC a tárolt információ jellegére vonatkozóan - tehát hogy zenei, szöveg- vagy videofelvételekről van szó - is tartalmaz adatokat.

A pitsáv letapogatása érintkezésmentesen, lézersugárral történik. A lézersugarat optikai rendszer fókuszálja és irányítja a spirális alakú pitsáv közepére. A CD forgása, valamint az optikai rendszer egyenes "előtolása" következtében a lézersugár a teljes információs sávon végighalad. A letapogatás a CD alsó oldalán folyik. A lézersugár felől nézve a sáv az óramutató járásával ellentétesen halad. A CD-n tárolt információ a lemez barázdáiról visszavert lézersugárral nyerhető vissza. A visszanyert információt hordozó jelsorozatot a digitális jelfeldolgozó áramkörök dolgozzák fel. A spirális alakú pitsáv letapogatásakor keletkező soros digitális jel frekvenciája a lemez fordulatszámától függ. Annak érdekében, hogy a jelfeldolgozó mikroprocesszor számára állandó frekvenciájú jelsorozat álljon rendelkezésre, a lemez fordulatszámát a letapogató rendszer mindenkor pozíciójához illesztik. Ily módon a spirális sáv minden pontján állandó letapogató sebességet biztosító fordulatszám-szabályozási eljárást CLV (Constant Linear Velocity) szabályozásnak, avagy konstans kerületi sebességű szabályozásnak nevezik. A CLV szabályozás következtében a letapogató-rendszer belső (a lemez középpontjához legközelebb eső) pozíciójában a lemez fordulatszáma kb. 500 ford./percre adódik, ami a lemez külső széléhez tartozó pozícióba érve folyamatosan kb. 200 ford./percre csökken. Ez tehát szöges ellentétben áll az analóg lemezek fordulatszám-követelményeivel. Ott a konstans fordulatszám a külső barázdákban lényegesen nagyobb kerületi sebességet eredményez, mint belül, ennek következtében (is) a bakelit lemezek eleje általában jobb hangminőséget biztosít a végénél.

A CD műsoridejét a spirális sáv hosszúsága és a letapogató sebesség határozza meg. A CD rendszerben kétféle letapogató sebesség terjedt el, ennek következtében két különböző maximális műsoridőről beszélhetünk. A standard CD rendszerben a maximális műsoridő 60 perc, a letapogató sebesség pedig 1,4 m/s. A letapogató sebesség 1,2 m/s-ra való csökkentése esetén pedig a maximális műsoridő 75 percre növekszik. A gyakorlatban vannak ugyan olyan (elsősorban komolyzenei) felvételek, melyek műsorideje több mint 80 perc, de ezek külső barázdáinak lejátszásakor (amikor a szabályozókörmek a normál tartományon túl kell lassítania a fordulatszámot) egyes lemeztárolóknál a lejátszás akadozóvá válhat, esetleg le is állhat.

A CD lemez előállításának folyamata

A CD-t 1,2 mm vastagságú műanyag lemezből alakítják ki. Kiindulási anyagként általában polycarbonátot alkalmaznak, de vannak PVC vagy akril alapú lemezek is. Gyártásánál magas technológiai színvonalú fröccsajtolási eljárást alkalmaznak. A gyártási tolerancia az átmérőre nézve (12 cm) max. 0,5 mm, a lemeztároló vastagságra vonatkozóan pedig max. $\pm 0,01$ mm lehet. Az excentritás mértéke nem lépheti túl a ± 50 μm -t. Egyes megmunkálási folyamatok olyan tisztított levegős feltételeket igényelnek, amilyenekre eddig csak az integrált áramkör előállításakor volt szükség. A konkrét lemez létrehozásának első lépéseként a fotólakkréteggel bevont üveglemezt (glassmaster) állítják elő. A fotólakkréteget spirális sávban haladva világítja meg a felvevőrendszer által vezérelt lézersugár. A megvilágítás a digitalizált hangjelek 0-1 állapotainak megfelelően történik.

Következő lépés a fotólakkréteg előhívása és a megvilágított helyekről való eltávolítása. Ily módon kiemelkedésekből és bemélyedésekből (pitékből) álló struktúra jön létre. Erről az első üvegmintáról galvanikus eljárással negatív másolatot készítenek, amelynek az alap-anyaga nikkkel (ez az ún. nikkel apalemez). Ezzel már lehetne CD-t sajtolni.

Annak érdekében, hogy az egyetlen össajtolási matricát megkíméljék, egy további munkafázisban - ugyancsak fémből - egy vagy több közbenső matricát is készítenek, ezek az "anyalemezek". A pozitív struktúrájú anyalemezekkel sajtolják a negatív struktúrájú sajtolási matricákat, a "gyermekeket".

Hasonlóan a lakkvágási technikával készített hagyományos analóg hanglemezekhez, a kész CD-k a gyártási folyamatnak már az ötödik generációi. A digitális információátviteli struktúra következtében azonban ezúttal nem lép fel minőségromlás.

A sajtolással előállított CD pitékkel és bordákkal ellátott felületét mindössze 40 nm vastagságú leheletnyi vékony alumíniumréteggel vonják be, tükrösítik. ($1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-9}$) Ez a tükrösített felület az információs sík. A tükrösítés után a CD-t még kb. 6 mm-es védőréteggel is bevonják. Mivel később erre az oldalra kerül a címke, a CD-nek ezt az oldalát címkeoldalnak (labelside) nevezik. A CD lemezen lévő pitstruktúra annyira sűrű, hogy egyetlen emberi hajszál kb. 40 pitsávot fedne le.

Ahhoz, hogy a CD lemez arányait jobban felfoghassuk, képzeljük el, hogy CD lemezünket ezerszeresére nagyítjuk. Ekkor vastagsága nem 1,2 mm, hanem 1,2 méter lenne. Átmérője - 120 méter - teljesen lefedne egy futballpályát. A közepén lévő lyuk 15 méter átmérőjű lenne. A pitek méretei azonban még ekkor is kicsinek mondhatók: szélességük mindössze 0,5 mm, maximális hosszúságuk 3,56 mm, minimális hosszúságuk 0,8 mm, a sávok egymástól való távolsága 1,6 mm, mélységük pedig csak 0,1 mm.

A címke felyomtatása előtti utolsó lépés a 15 mm átmérőjű középnyíl elkészítése. A pontos beállítást lézeres pozicionálással végzik, a belső sávhorony alapján.

A CD címkeoldalának vékonysága miatt nagyon érzékeny a mechanikai sérülésekre. A legkisebb benyomódások, pl. a címkeoldalra írt golyóstollas felirat is az információs sík megsérüléséhez vezethet.

Valamivel kevésbé érzékeny a mechanikai sérülésekre a transzparens réteg, azonban ez is óvatos bánásmódot igényel. A transzparens réteget mindig tiszta, száraz ronggyal kell tisztítani, sugárirányú mozdulatokkal. Ezáltal megakadályozhatjuk a sávirányú karcolások keletkezését.

Hibajavítás szükségessége a digitális rendszereknél

A CD indulásakor legendák születtek arról, mennyire nem érzékeny a hibákra. A gyakorlati tapasztalatok azonban azt mutatták, hogy bizonyos sérülések ugráshoz, vagy a lemez lejátszhatatlanná válásához vezetnek, és hogy a karcos lemezek igenis gyengébben szólnak a hibátlan példányoknál.

A digitális hangátvitel adatkiesési érzékenységét, és a CD lemezek sajátosságait figyelembe véve tehát olyan hibajavítási eljárásra van szükség, amelytől elvárható, hogy akár 10-100 kódszó kiesése esetén is hibátlanul reprodukálni tudja a kimaradt információt. A hibajavítási eljárások rendkívül bonyolult magasabb matematikai műveletekkel dolgoznak, ezekkel nem akarnám (nem is tudnám, én magam sem értem) az olvasókat untatni, de két alapvető eljárást szeretnék megmutatni önöknek. Az egyik a paritásvizsgálat. Ennek során az információs biteket egy paritásbittel egészítjük ki. A korrekciós bit értéke egyrészt attól függ, hogy hány bináris 1 van az eredeti szóban, másrészt, attól, hogy milyen megállapodás szerint végezzük a paritásvizsgálatot. Megkülönböztetünk páros és páratlan paritást. Páros paritás esetén a paritásbit értéke akkor lesz 1, ha az eredeti kódszóban levő 1-ek összege páratlan. Páratlan paritás esetén a helyzet fordított. Hogy az átvitel során keletkezett-e hiba, azt az adatszó dekódolásánál vizsgáljuk meg. Amennyiben a paritásbit képzésének szabálya ismert (vagyis, hogy páros vagy páratlan paritásról van-e szó) az információs bitek és a paritásbit egyszerű összehasonlításával megállapítható, hogy az átvitel hibás volt-e vagy sem.

Nyilvánvaló, hogy az egyszerű paritásvizsgálatnak komoly korlátai vannak. Abban az esetben ugyanis, ha egy adatszóban egyszerre több hiba is adódik, előfordulhat, hogy az egyik hiba paritásspontból kompenzálja a másikat, miáltal a paritásbit hibátlan átvitelt jelez. További hátrány, hogy átvitel során maga a paritásbit is megsérülhet, illetve arról, hogy melyik bit sérült meg, nem ad tájékoztatást, tehát nem állítható vissza az eredeti szó. Ennek ellenére több bonyolultabb módszer alapját képezi.

Annak érdekében, hogy az adatszóban esetlegesen előforduló hiba ne csak felismerhető, hanem javítható is legyen, további eljárásokra van szükség. A legegyszerűbb hibajavítási lehetőség a keresztparitás-vizsgálat. Ennek során az egyes kódszavakat mátrix alakba rendezéssel újra meg kell vizsgálni. A sor-és oszlopparitás ismételt megvizsgálásakor a keresztelési pontban megjelenik a hibás bit. A korrekció egyszerű invertálással elvégezhető.

A gyakorlatban a paritást nem egyes bitekből, hanem komplex kódstruktúrákból álló redundanciaszakvakból képezik. Ezeknek a kódoknak képzési stratégiája a CD lemeze leginkább jellemző hibák fajtájához igazodik.

A CD-n tárolt információ a digitalizált hangjelbiteken kívül a hibajavítás és az időkódolás adatait, valamint a vezérlő- és jelző-adatokat is tartalmazza. További bitek keletkeznek a forráskódolású jel csatornakódolásúvá való átalakítása során. A felvételi folyamatban valamennyi adatot egyetlen adatfolyamba foglalják is így vezetik a "vágólézerre". Nézzük meg, hogyan jön létre ez az adatfolyam.

A CD lemezek felvételi formátuma

Az analóg hangjelek digitalizálása a sztereó rendszer jobb és bal csatornáira nézve külön-külön történik.

Hasonlóan a normál magnókhöz, a CD rendszerben is előkiemelést alkalmaznak a hangfrekvenciás spektrum felső tartományában a jel-zaj viszony növelésére. Kétféle időálló közül lehet választani: $T_1=50$ ms, $T_2=15$ ms. A választástól függően a 6 dB/oktáv magashang-kiemelés 10,6 kHz-nél (15 ms), ill. 3,18 kHz-nél (50 ms) kezdődik. A választott előkiemelésről tájékoztató jelzést a kiegészítő információk tartalmaznak. Kapcsolástechnikailag a magashang-kiemelés a felvételi út analóg szakaszában történik.

Az előkiemelés után a hangjel frekvencia-tartományát az antialiasing aluláteresztő szűrővel 20 kHz-re korlátozzák. Erre a szűrésre azért van szükség, mert a digitalizálás során a mintavételi frekvencia alatt és felett megjelenik az átvitt sáv spektruma ill. annak tükörképe. Amennyiben a digitalizálni kívánt analóg jel a mintavételezési frekvencia felénél magasabb frekvenciájú összetevőket tartalmaz, magasabb tartományban átlapolódás, avagy egy ún. aliasing torzítás jön létre, amely különbségi hangok termelésével a hallható tartományban is megjelenik. Erre a problémára később a digitális szűrők taglalásánál visszatérünk.

Határolás után az analóg jel mintavevő és -tartó áramkörre kerül a mintavételezéshez (44,1 kHz-es mintavételi frekvenciával). Ezt követően a mintavett jelet egy 16 bites A/D átalakító lineárisan kvantálja. Ennek korlátairól már beszéltünk. Ennek ellenére a jelenleg alkalmazott digitális rendszereknél szinte kizárólag a lineáris kvantálás terjedt el, kivéve a DAT magnók LP üzemmódjában, ahol nemlineáris kvantálást használnak, ellensúlyozva ezzel a 12 bites felbontást. A linearitás problémájának megoldására később a kisbites jelátalakítóknál még visszatérünk.

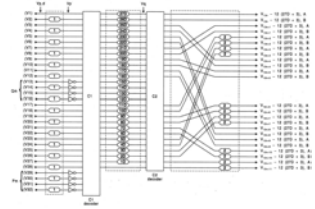
A mintavételezéskor kapott diszkrét mintákat PAM (Pulse Amplitude Modulation, azaz impulzusamplitúdó-modulációs) jelnek hívják. (3. ábra) Ez azt jelenti, hogy a kapott impulzusok nagysága szimbolizálja az eredeti amplitúdó nagyságát. Ezt a PAM jelet alakítja át az A/D átalakító bináris jellé, majd egy ún. kettes komplement kódoló egység PCM jellé. Így az A/D átalakító kimenetén minden mintavételi érték egy 16 bites bináris kódszó formájában jelenik meg. Ezután következik a hibajavító és egyéb rendszerkódok elhelyezése.

Hibajavító és rendszer-kódok a CD lemezek

Nem akarok belebonyolódni a CD rendszer hibajavító blokkjainak sémájába, de azt érdemes megnéznünk, hogy a lemezekre milyen összetevőjű blokkok kerülnek fel, már csak azért is, mert ez képezi az időosztásos eljárás alapját. Egy adatblokk a jobb és a bal hangcsatorna 6-6 mintavételi értékéből képzett 12 db 16 bites adatszót tartalmaz. Ezeket 24 db 8 bites kódszóra, ún. szimbólumra alakítják át. Ezekhez a szimbólumokhoz négy 8 bites paritáskódszót képeznek. Így már 28 db 8 bitből álló kódszavunk van. Ezen kódszavak sorrendjét összekeverik (interleaving), hogy az adatok ne a keletkezésük sorrendjében kerüljenek az átviteli csatornára, hanem időben is és térben is eltolva. Ily módon az átvitel során fellépő esetleges zavarok (adathibák, jelkimaradások) következtében meghibásodó adatblokkok jobban rekonstruálhatók.

Ezután a 28 szimbólum egy további kódolóra kerül, ahol további 4 db 8 bites paritáskódszóval egészítik ki. Így összesen 32 szimbólumból adatblokkokat kapunk (256 bit). Ezt a 24-ről 32 kódszóra való átalakítást, beleértve a kódszavak összekeverését CIRC kódolásnak nevezik (Cross Interleave Reed Solomon Code, azaz keresztbehelyezéssel Reed Solomon Code). (4. ábra) A Reed-Solomon kód olyan blokk-kód, ami a kódolás előtt az adatszavakat mátrixformába rendezi, és a sorok és oszlopok alapján keresztsummákat képez. A végleges adatblokkot framének nevezik.

Mivel minden keret 6 mintavételi érték információit tartalmazza, és az egyes mintavételi értékek eredetileg 1:44,1=22,67 ms-onként jelennek meg, a keretek ismétlődési sebessége könnyen meghatározható: $44100/6=7350$ Hz. Ez a CD rendszer keretfrekvenciája. Mivel a keretfrekvencia a CD rendszer valamennyi órajelfrekvenciájának meghatározásában szerepet játszik, igen fontos jellemzőnek számít. Erre később a kiolvasott EFM jel szinkronizálásánál visszatérünk.



Az EFM kódolás

A bonyodalmak azonban még csak ez után kezdődnek. Az így kapott 256 bites frame-et kiegészítik 8 kontroljellel. Ezt az ún. kibővített 264 bites keretet az EFM moduláció végül is 588 csatornabitté duzzasztja. A keretismétlődési sebesség és a csatornabitek szorzata adja a CD rendszer végleges adatátviteli sebességét: 4,3218 Mbit/s.

Miért van szükség az EFM (Eight to Fourteen Modulation azaz a "Nyolc a tizennégyhez" modulálás) kódolásra? A leglényegesebb szempont, hogy az átvitt adatjel soros, külön órajelet nem tartalmaz. Az adatoknak a dekódoló áramkörbe való beolvasásához azonban szükség van órajelre. Emiatt a csatornakódolást úgy kell kialakítani, hogy időegységenként elegendő pitél legyen felismerhető, azaz a legnagyobb futási hosszak annyira kicsinek kell lennie, amennyire az csak lehetséges. Ezen túl pedig a CD játsszók sávkövető és szervo-áramköreinek hibafeszültségei a letapogató-rendszerből erednek, frekvenciatartományuk az alacsonyabb (0-20 kHz-es) tartományba esik. A CD szennyeződésai és karcolásai is kisfrekvenciás zavarjel komponenseket hoznak létre. Annak érdekében, hogy ezeket a zavarjeleket felüláteresztő szűrő beiktatásával távol tarthassuk az átviteli csatornától, magának az adatjelnek ebben a tartományban nem szabad hasznos komponenseket tartalmaznia.

Látszólag paradox dolog, hogy az átvinni kívánt adatok ilyen módon való felduzzasztására részben pont azért van szükség, hogy ne kelljen túl nagy sávszélességet használni a CD lemezre való írásra. A CD-re készülő felvétel során ugyanis a bináris értékek (élváltozások) felváltva be-, ill. kikapcsolják a vágólézert. Következésképpen a pitek hossza és a pitek közötti szünetek jelenítik meg a digitális jelfolyamot. Eszerint a bináris 0 értékeknek vagy pit, vagy pedig két pit közötti szünet felel meg, a bináris 1 értékekkel ezzel szemben a felfelé vagy lefelé futó pitél reprezentálja. Gyakorlati vizsgálatok azt állapították meg, hogy a CD rendszer által képviselt átviteli csatornához akkor a legkedvezőbb az adatszavak kódolásának illesztése, ha a kódot úgy választják meg, hogy minden bináris 1-et reprezentáló felfutó él közé minimálisan két, maximálisan 10 bináris nulla kerüljön. Ez fogja meghatározni a minimális és maximális pithosszúságot is.

Egy nyolc bites bináris szó 256 különböző értéket vehet fel 00000000 és 11111111 között. Logikusan közöttük sok olyan lesz, amely nem felel meg a fenti feltételeknek. Növelve a szükséges bitek számát, a 14 bites kódhosszúság az első, amely a fenti feltételeknek megfelel. A $2^{14}=16384$ lehetséges kódkombináció között 267 olyan adatszó van, ami eleget tesz a "minimum 2, maximum 10 egymás utáni bináris 0 érték" feltételnek. A felesleges 11 ($267-256=11$) kódként azokat jelölték meg, amelyek több szó összekapcsolásánál okoztak volna nehézségeket.

Két kódszó egymáshoz illesztése során persze megint felborul a kódstruktúra. Ezért minden kódszó közé három olyan ún. merginbitet illesztettek meg, amelynek értékét úgy választják meg, hogy a kódszavak egymás utáni sorozata is megfeleljen fenti feltételeknek. A valóságban a 8 bites forráskódolású szavakat ROM-ban tárolt 14 bites csatornakódoknak feleltetik meg.

Annak érdekében, hogy a lejátszás során a CD játsszók az egyes kereteket ki tudják választani az adatfolyamból, és hogy a szinkronizálást meg lehessen oldani, a végső 588 csatornakeret első 24 jelét az ún. szinkronizáló bitek teszik ki. A szinkronjel a következő: 1000000000100000000010, vagyis két maximális pithosszt jelöl ki az egyesek között 10 nullával.

A CD játsszók kiolvasó rendszerének mechanikai felépítése

Miért van olyan nagy jelentősége a CD játsszók mechanikai felépítésének? Hiszen digitálisak, tehát a kiolvasórendszer felépítése nem szabadna, hogy befolyásolja az általa produkált hangot. Vagy mégis lenne a CD játsszók futóművének saját hangja? A feltételezés nevetségesnek tűnik, de amikor a hetvenes években a Linn cég kijött speciális konstrukciójú futóművével a Sondekkal, és nem kevesebbet állított, mint hogy a futóműnek is van saját hangja, a legtöbb ember hitetlenkedve csóválta fejét. A Linn relatív magas ára ellenére szép karriert futott be, és ma már senki sem vitatja, hogy a lemezjátsszók futóműve is jelentősen befolyásolja az elért hangminőséget.

Mi a helyzet a CD játsszókkal? Azt bárki tapasztalhatja, hogy ha a CD játsszót közvetlen a hangsugárzó közelében helyezik el, akkor nagyobb hangerőnél előfordulhat, hogy a CD játsszó ugrani, téveszteni fog. Természetesen ez már szélsőséges eset, de kisebb hangerőnél is befolyásolja a lejátszóberendezés működését a megszólaltatott zene, illetve tovább gondolva a dolgot, a CD játsszót érő bármilyen rezgés, amely eredhet a hálózati transzformátorból, a mechanikát működtető szervomotorokból, a környezetből, bárhonnán. Érthető hát, hogy a CD játsszókat is célszerű speciális állványra állítva hallgatni. A nyolcvanas évek végére egyre több cég jött ki speciális felépítésű futóművel, és úgy látszott, igazuk van. A jelenség látszólag érthetetlen, de a hagyományos lemezjátsszónál alkalmazott módszerekkel is detektálható.

Ilyen méréseket végzett el 1987 környékén forgalmazott CD játsszókon az akkor Hifi Magazinból Hifi Mozaikká átalakult folyóirat. Ugyanazt a módszert használták, amely a lemezjátsszók hasonló tulajdonságainak tesztelésére szolgál: az akusztikai visszahatás vizsgálatot. A mérési eljárás lényege a következő: a lemezjátsszót elhelyezik egy olyan

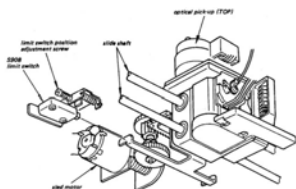
hangsugárzótól fél méterre, amelynek szélessávú hangszórója koncentrikus, tehát pontszerűen sugároz. A hangsugárzó elé egy mikrofont szerelnek, amellyel úgy vezérik a meghajtó-erősítőt, hogy a hangnyomás állandóan 91 dB legyen. A CD játszóba egy olyan lemezt helyeznek, amelyen csend van rögzítve. Lejátszásra kapcsolják, és ezután a hangsugárzóból egy teljes frekvenciatartományt átfogó kúszójelet sugároznak. A CD játszó kimenetét egy szintiróra vezetik, és az itt megjelenő jelet figyelik.

Teljes joggal gondolhatjuk, hogy egy ilyen vizsgálatnak semmi értelme sincs. Hiszen a lézer pick-up nem érintkezik a lemezzel, az elektronikát pedig hiába rázza az ember. Ehhez képest a mérés felettébb érdekes eredményt mutatott.

Tény, hogy a CD játszó akusztikai visszahatása nagyságrend(ek)kel kisebb a hagyományos lemezjátszókénál, de van nekik. Ami még ettől is érdekesebb, hogy karaktere éppen ellentéte azoknak. A bakelit lejátszóknál a rezonancia csúcsa a 20-50 Hz-es tartományba esik, innentől folyamatosan esik, majd 200 Hz környékén beáll egy átlagos szintre. Ezzel szemben a CD játszó akusztikai visszahatásának jelleggörbéje 500 Hz-ig nagyjából egyenletes, majd innen néhány nagyobb csúcs után 7-8 dB/oktáv meredekséggel emelkedik, míg 10 kHz környékén beáll egy szintre. Ez a típusú jelleggörbe inkább a hagyományos lemezjátszó hangkarjában fellépő strukturális rezgésekre (karrezonancia) hasonlít. Ez utóbbit úgy mérik az analóg lemezjátszóknál, hogy a hangkarra egy gyorsulásérzékelőt szerelnek, és ez után lejátszanak vele egy 20 Hz-20 kHz tartományú jelet tartalmazó lemezt. A CD játszóban erre persze nincs lehetőség. Még érdekesebb az, hogy a fent említett tesztben három olcsó kategóriás CD játszót vizsgáltak meg, és közöttük az eltérés több nagyságrendnyi volt (nagy kommersz gyártók lemezjátszó között jó, ha néhány dB különbség adódik).

A tesztben akkoriban legjobban szereplő CD játszó Philips volt, és a holland cég által gyártott lengőkaros mechanikát használta. A dolog pikantériáját adja, hogy erről a mechanika-rendszer gyártásáról mára a Philips is leállt. Oka egyszerű. Ma már a CD játszóban ugyanazokat a mechanikákat alkalmazzák, amelyeket a CD-ROM olvasókban. Ezeknél pedig a gyorsaság rendkívül fontos.

A mechanikák fejlesztési irányvonalai napjainkban



A kezdet kezdetén két alapvetően eltérő mechanikai rendszert alakítottak ki. Az egyiknél (a Sony által használt eljárás) a letapogatórendszer két vezetősín mentén mozog, a mozgatásról pedig a szánmotor által hajtott csigahajtómű gondoskodik. A másik a Philips nevéhez fűződik, itt az optikát egy lengő karra szerelték, melynek mozgatását mágneses úton tekercsekkel végzik.

Az újabb készülékekben már lineáris motort alkalmaznak a letapogató rendszer mozgatására. A lineáris motoros meghajtás fő előnye, hogy az előtölteshez lényegesen kevesebb meghajtási energiát kell

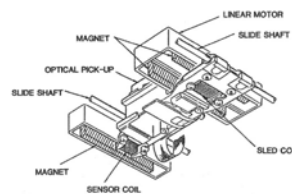
legyőzni, mint a csigahajtómű esetén. Ezenkívül az egyes zenészek számok hozzáférési ideje is megrövidül (a tipikus hozzáférési idő kisebb, mint egy mp.).

A lineáris motor két mágnesrúdból és egy munkatekercesből áll. A munkatekercesen a szánmotor vezérlőárama folyik át. A kialakuló mágneses térben erőhatás jön létre, ami a szánt (és vele együtt a letapogató-rendszert) mozgatja. Ez teszi lehetővé a CD-ROM olvasók nagyságrenddel nagyobb kiolvasási sebességeit. Ma 1998-ban a 24-32-szeres olvasók vannak a piacon, közülük azonban jó néhány olyan van, amely kiolvasási hibái miatt annyiszor kénytelen ismételni, hogy valójában egy kb. nyolcszoros sebességű CD-ROM olvasó folyamatos sebességét produkálja. De van néhány, amely valóban képes hibamentesen a 24-szeres kiolvasási sebességre. Ha jobban belegondolunk, itt a kiolvasási frekvencia $4,32 \text{ MHz} \times 24 = 103,7 \text{ MHz}$.

Több audiofil gyártó használja ezeket a nagy sebességű mechanikákat arra, hogy nagyobb rendszerfrekvenciát alkalmazva többszörös sebességgel olvassák a lemezeket, és nagyobb kapacitású RAM-okat használva biztosítsák a jel zittermentességét, vagy többszörös olvasással próbálják meg kiküszöbölni a kiolvasási hibákat.

Ezen az elven működnek a hordozható vagy autókban használt CD játszóknál alkalmazott rázkódásvédő áramkörök. Van egy olyan újítás, amelyet azonban kizárólag az asztali CD játszó mechanikájaként hoztak piacra. Ez a Sony egy újabb rendszere, a rögzített lézerveres mechanika, érdekes felépítésű konstrukció. A lényege az, hogy nem a lézerveres mozgatják a lemezt, hanem a CD-t a mechanikához rögzített lézerveres fölött. Ez látszólag fából vaskarika eljárás, mert miért lenne könnyebb egy lerögzített puska előtt mozgatni a céltáblát, mint egy mozgó puskával követni egy rögzített célpontot? A Sony mérnökei szerint a mechanikák kiolvasási hibáira a kis tömegek a felelősek, elsősorban a lézerveres optikáé, amelynek rezonanciája lényegesen magasabb tartományba esik, mint a nála nagyobb tömegű lemezé, és az azt forgató szerkezeté. Az állítást alátámasztja az az észrevétel, amelyet az akusztikai visszahatás vizsgálata közben tapasztaltak, hogy ez a CD játszóknál valóban a magasabb frekvenciákra esik. A rögzített lézerveres mechanika előnye, hogy a CD lemezt egy nagyobb súllyal le is lehet terhelni, és ez a lemezek vetemedettségéből származó hibákat is kompenzálja. A dolog egyetlen hátránya a relatív lassú számolási sebesség lett.

Nézzük meg alaposabban, hogyan épül fel a mechanika rendszer és a szorosan hozzá kapcsolódó szervóáramkörök.



A lézerveres letapogató

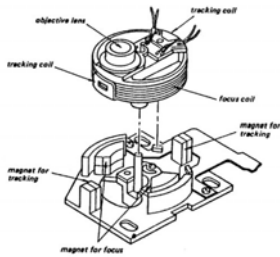
A CD lemezek letapogatójára lézerveres alkalmaznak. Eredeti jelentése Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, azaz LASER, amit leginkább "gerjesztett fényerősítésű sugárzásnak" lehetne fordítani. Nem akarok különösebben belemélyedni az optikai rendszer működésébe, különösen, hogy itt én magam sem tudnék többet mondani, mint ami a szakirodalomból kiollózható. A lényeg, hogy az eredeti CD szabvány előírásai szerint a lemezek letapogatójához 780 nm hullámhosszúságú lézerveresre van szükség. Ez a sugárzás a nem látható, infravörös tartományba esik. A DVD szabványosításánál már rövidebb hullám-hosszú, 650 nm-es lézerverest használtak. A rövidebb hullámhosszú, több ezer óráig működőképes lézerveres előállítására előfeltételei a nagyobb adatsűrűséggel rendelkező lemezek létrehozásának. Ezeknek a kifejlesztésén fáradoznak ma a gyártók.

A CD lemezek kiolvasására használt lézerveres kimeneti teljesítménye kb. 1mW. Ennek precíz betartása rendkívül fontos. Ha ugyanis a lézerveres intenzitása lecsökken, akkor csökken a kiolvasás pontossága, ha a teljesítmény tartósan

magasabb, rövidebb lesz az élettartama, szélsőségesen nagy teljesítmény esetén pedig a lézerdíóda megy tönkre, de előtte akár át is égetheti a lézerlemez tükröző rétegét.

Az információs sík letapogatásánál fontos szerepe van a CD lézer felőli oldalán található átlátszó (transzparens) műanyag rétegnek. Ugyanis a lézerlemezre eső fénysugár átmérője még elég nagy, kb. 0,8 mm. Ennek köszönhető, hogy a felületi hibák nem teszik kiolvashatatlanná a lemezt. A műanyag törésmutatóját úgy választják meg, hogy a lézersugár átmérője a pítávokhoz érve már csak 1,7 mm, tehát alkalmas azok letapogatására. Ez az átmérő még mindig kb. háromszorosa a pítáv szélességének, nagysága inkább a pítávok egymástól való távolságának felel meg (1,6 mm). Érthető ezek után, hogy a transzparens réteg és az információs sík hibamentessége, fénytörésmutatójának egyenletessége mennyire fontos.

A lézerdíódát a fényt irányító, polarizáló, tükröző, felfogó elemekkel együtt egy egységbe szerelik. Ennek az egységnek szerves részét képezi a fókuszálást végző ún. kéttengelyű elem, amely tulajdonképpen a lézer fókuszálására szolgáló lencsét mozgatja. Ennek egyik tengelyre történő elmozdulása a fókuszot szabályozza, a másik a pítávon való haladást biztosítja. A CD lemez vetemedettségének következtében bekövetkező fókusz-távolság változás dinamikus utánállítása rendkívül fontos, mert az információs síknál a lézer fókuszpontjának mélységélessége mindössze ± 4 mm. Ugyanilyen jelentős az excentritásból eredő sávkövetés-hiba kiküszöbölése. A lencse mozgató-rendszerének kialakítása állandó mágnesekből és tekercsekkel áll, működési elvét tekintve részben egy hangszóró, részben egy motor mechanizmusára hasonlít. A tekercsek áramát két szervórendszer állítja elő. A szervórendszer szabályozását a visszavert fényt érzékelő fotódíódák szabályozzák. Többfajta eljárás is elterjedt, a részletesebben érdeklődő olvasók figyelmébe ajánlanám ismét a szakirodalmat.



Szervórendszerek a CD lejátszóban

Ha a CD játszók komplett felépítését nézzük, összesen négy szervórendszert tartalmaznak. Ebből kettő a fent már említett fókusz és sávkövető szervó, és további kettő közül az első lézeroptika mozgatását, a második a CD lemez forgási sebességét szabályozza.

A sávkövetőszervó szabályozási tartománya legfeljebb 15-20 sávnyi átfogást tesz lehetővé

a kéttengelyű elem számára. Ez a sávátfogás csak keskeny sávban biztosítja a sávutánállítást. A letapogató-egység durva utánállítást a szánszervó végzi.

Ez utóbbi nem különül el teljesen a sáv-követőszervó szabályozó áramkörtől. A szánszervó azonban csak nagyobb léptékű szabályozásra képes, a nagy tömegű mechanikát nem könnyű finoman indítani és fékezni. Ez a durvább szabályozás a sávugrás funkció. A sávugrás funkció során a letapogató-rendszert spontán kell nagyobb távolságra vezetni. Ehhez a folyamatvezérlő áramkör egy ún. kickimpulzust küld a szánszervó-áramkör bemenetére. A kickimpulzus polaritása az ugrás irányától függően negatív vagy pozitív.

Míg a szállítómechanizmus mechanikai felépítésében jelentős különbségek vannak (lásd feljebb), addig a szánszervó kapcsolástechnikai kialakításában alig mutatkoznak különbségek az egyes CD lemezjátszók között.

Sávugrás a CD lemezen

A CD lemezjátszók egyszerű kezelhetőségét többek között az egyes zeneszámokhoz való tetszőleges hozzáférés és a gyors előre-hátraléptetés teszi lehetővé. Ezeket a sajátosságokat a sávugrás funkció biztosítja. A sávugrás funkció a szánszervó-, és a sávkövető-szervókkal valósítható meg.

A sávugrást általában az 1-es, 10-es, és 100-as ugrások valamilyen kombinációjaként állítják elő. A "gyors előre" és "gyors hátra" üzemmódokban kizárólag 1-es sáv-ugrásokat alkalmaznak. A sávugrás előidézéséhez a folyamatvezérlő áramkör kickimpulzust küld a sávkövető ill. a szánszervó áramkörre. Az ugrás fajtáját, irányát és a kickimpulzus időtartamát a folyamatvezérlő áramkör számítással határozza meg. Az ehhez szükséges információkat a CD betöltésekor beolvasott tartalomjegyzék (TOC) és a kezelőszerveken keresztül bevitt parancsok adják.

Lássuk most egy konkrét példán keresztül, hogy valamely zeneszám kiválasztásakor hogyan jön létre ugrásutasítás. Az ugrás céljának a CD 3. zeneszámát választjuk. A beolvasott időkód alapján a folyamatvezérlő áramkör "tudja", hogy a kiválasztott cím az 526-os sávon kezdődik. Az ugrás ennek megfelelően öt 100-as, két 10-es és hat 1-es kickimpulzusból tevődik össze.

Az 1-es és 10-es ugrásokat a kickimpulzusok felhasználásával a sávkövető-szervo hozza létre. A 100-as ugrásokat ezzel szemben a szánszervó, ugyancsak a kickimpulzusokkal.

A kickimpulzusok előállítását nem egyszerű feladat. Az időben történő lefékezéshez figyelembe kell venni a letapogató-rendszer és a kéttengelyű elem mozgási energiáját, valamint a szánhajtás súrlódási együtthatóját is. Emiatt a kickimpulzusok időbeli lefolyását ugrási és fékezési szakaszra osztják. A kiválasztott sáv elérése előtt a kickimpulzus polaritást vált, és megkezdődik a fékezési szakasz. A sávból még hátralevő útszakaszt a letapogató-rendszer, ill. a kéttengelyű elem saját mozgási energiájával teszi meg.

Az ugrási és fékezési szakasz időtartama készülékspecifikus jellemző. A stabil ugrásfunkció biztosítása érdekében erre az időre a sávkövető erősítő bemenetéről minden esetben leválasztják a sávkövető hibafeszültséget. Az ugrásfunkció befejezése után a folyamatvezérlő áramkör zárja a sávkövető szabályozókört, és a sávkövető finomszabályozó áramkör a kiválasztott sávra áll be.

A CD lemez fordulatszám-szabályozása

A lineáris letapogató sebesség eléréséhez a CD fordulatszámát a letapogató-rendszer aktuális helyzetéhez illesztik. Ezt a műveletet a diszkuszervó végzi, amelyet éppen ezért "CLV-szervó"-nak is neveznek.

A diszkuszervó sebességszabályozó és fázisszabályozó áramkörből áll. A sebességszabályozó áramkör úgy szabályozza

a CD forgási sebességét, hogy a letapogatott információ adatáramlási sebessége mindig 4,32 MHz-es órajelnek feleljen meg.

A lineáris letapogatási sebesség finom-beállítását a fázisszabályozó áramkör végzi. Ugyancsak ez az áramkör biztosítja a CD-ről leolvasott pitélek (a főórajellel együtt) és a digitális jelfeldolgozás közötti merev fázis-kapcsolatot. Általában a diszkszervókban négy különböző üzemmód különböztethető meg:

1. A felfutási szakaszban indul meg a CD forgása. A diszkmotor egy kickimpulzus hatására gyorsan eléri a névleges fordulatszámot.
2. A durva szervószabályozás üzemmódban a sebességszabályozó áramkör a névleges értéken tartja a diszk fordulatszámát. Akkor van erre szükség, ha valamilyen oknál fogva nem áll rendelkezésünkre a keret-szinkronjel.
3. Finom szervószabályozás esetén az adatáramból visszanyert keretszinkronjel szinkronizálja a forgást. Ez a normális lejátszási üzemmód.
4. A fékezési szakaszban történik a CD leállítás. A diszkmotort pontosan méretezett, fordított polaritású kickimpulzus fékezi, amíg meg nem áll.

A hangminőség szempontjából a 3. fázisszabályozási szakasznak van jelentősége, nézzük meg ezt egy kicsit alaposabban.

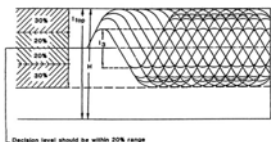
Fázisszabályozás

Minden szabályozó áramkör úgy működik, hogy egy szabályozni kívánt mennyiséget összehasonlítanak egy referenciának választott mennyiséggel, és a különbségnek megfelelően a szabályozni kívánt mennyiséget a referenciamennyiséggel egyenlővé próbálják tenni. Jelen esetben a CD lemezről kiolvasható pitstruktúra órajele a szabályozni kívánt mennyiség. Ezt a CD játsszóban az ún. WFCK impulzus (Write Frame Clock, azaz írási keretfrekvencia) képviseli. A WFCK impulzust a CD-ről keretenként beolvasott 24 szinkronizálóbit alapján állítják elő. A keretisméltódesi frekvencia értéke a CD rendszerben 7350 Hz, tehát megfelelő letapogatási sebesség esetén 136 ms-onként jelenik meg egy WFCK impulzus.

A fázisszabályozás referenciajelét a CD játsszó kvarcoszcillátorából leosztott ún. RFCK (Read Frame Clock, azaz olvasási keretfrekvencia) adja. Ezen két jel szinkronitását biztosítja a fázisszabályozó áramkör a CD lemez fordulatszámának szabályozásával.

Jittermentesítés

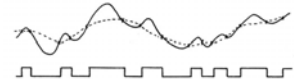
A lézertoptika jelét előerősítőre vezetik. Ennek kimenetén szinuszos nagyfrekvenciás jel, a szemábrajel jelenik meg. Azért nevezik így, mert ha a kapott adatjelet egy oszcilloszkóp függőleges (Y) bemenetére vezetjük, a regenerált órajellel pedig a vízszintes (X) bemenetet szinkronizáljuk, az oszcilloszkóp képernyőjén a legkülönbözőbb szint és fázishibájú impulzusok egymásra rajzolódva jelennek meg. A kapott oszcillogram egy nyitott szemre hasonlít. A "szem" nyílása az átvitel minőségének jellemzésére használható. A szemnyílás függőleges nagysága a jel amplitúdójától függ, a fázishibák a vízszintes kiterjedést határozzák meg. Ha az egymás utáni jelek egyetlen vonalként jelennének meg, akkor a kiolvasás hibátlan lenne. Ez azonban a gyakorlatban szinte sohasem valósul meg. (ábra)



A digitális áramkörben való további jelfeldolgozáshoz a szemábrajelet úgy kell átalakítani, hogy négyszögjelekből álló EFM formátumú csatornakódolt jelnek feleljen meg. Általában egy folyamatosan változó szinuszjelből úgy hozhatunk létre impulzus (négyesjög) jelet, ha az előbbi egy Schmitt-triggerre vezetjük. A Schmitt-trigger a bejövő jel hatására két szélsőérték között kapcsolgat, úgy hogy ha a növekvő bemenő jel nagysága eléri egy bizonyos szintet, pozitív, ha a csökkenő jel ugyanazt a szintet

eléri, negatív szélsőértékre vált.

A kiolvasott szemábrajel azonban a CD lemez hibáinak következtében gyakori szint-ingadozásokat tartalmaz, melyek eltolják a jel középvértékét. (ábra) Az impulzusformáláshoz tehát nem elegendő a jelet Schmitt-triggerre vezetni, mert annak állandó kapcsolási



referenciaszintje a kiolvasott jelet meghamisítaná. Ehelyett egy olyan triggerre alkalmaznak, amely a szinuszjel középvértékének ingadozását figyelembe véve a kapcsolási szintet folyamatosan utánszabályozza. Az így visszaállított jel elvben már megfelel a vágólézert szabályzó EFM jelnek. Ebből az EFM jelből először is regenerálják az órajelet. Ezután demodulálják a jelet, és visszaállítják az eredeti bitstruktúrát. Ezek után jitterkorrekciót végeznek.

A digitális szakaszban végzett műveletek közül talán a jitterkorrekció van a legnagyobb kihatással a hangminőségre.

Ugyanis az EFM jel jitterhibája a hallható tartományban futásidő ingadozást hoz létre. A futásidő ingadozások megváltoztatják a jel fázisviszonyait, anélkül, hogy a frekvenciamegetben és zerevehető hatása lenne. Napjainkban egyre inkább előtérbe kerül a jitterhiba kiküszöbölése. Egyre több cég hoz forgalomba ún. jitter-killer-t, amely az órajelek hibáját küszöböli ki. A nyugati hifi magazinok mérései a jitterhibára is kitérnek. Kiküszöbölése érdekében építenek be különböző speciális órajeladókat. Ezeknél általában nagyobb pontosságú kvarckristály építenek be, és a jeladó oszcillátort külön stabilizált tápfeszültségről járatják. A kvarcoszcillátorok frekvenciájának stabilitása ugyanis általában a tápellátás egyenletességétől függ. Ezért lehet például eredményes az analóg kimeneti szekció akkumulátorról történő táplálása.

A jitterhiba kiküszöbölésére egy átmeneti RAM tárolót használnak, amelyből az adatokat kvarcstabilitású főórajel ütemében végzik. A korrigálható maximális időzítési hibát a RAM kapacitása határozza meg. A CD lemezjátszóban e célra alkalmazott RAM kapacitását úgy választják meg, hogy többnyire ± 4 jitteres keret legyen korrigálható.

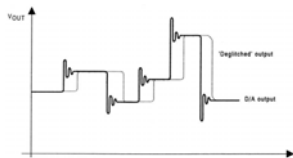
Hibajavítás a kiolvasott jelben

Ezután következik a hibajavítási és hiba-kompenzálási funkció. Ezeket a bonyolult elektronikákat általában egyetlen integrált áramkör formájában készítik el, működésének részletezése ennek következtében nem túlságosan lényeges. A hibakompenzálásra akkor van szükség, ha a jel hibáit a deinterleaving eljárás során nem lehet javítani. Ilyenkor több lehetőség van a korrekcióra. A legegyszerűbb esetben az előző kódszót használják fel a hiányzó információ pótlására. Ezt az eljárást a "previous word hold" (előző szó tartása) eljárásnak nevezik. Amennyiben az előző adatszó is hibás, interpolációs eljárással - összekapcsolva az interleaving eljárással - nagyobb adatkiesés is kompenzálható. Amennyiben a hibát az interpolációval nem lehet elfedni, a hibajavító áramkör jelzést ad a folyamatvezérlő áramkör számára, ami letiltja a hangfrekvenciás kimenetet - azaz némít.

A hibajavítás stratégiája a hibajavító áramkör hardver-, és szoftverfordításától függ. Ebben a tekintetben jelentős különbség van a különböző típusú CD játszóknak között. Az egyszerűbb készülékek dekódolójában 4 fajta hiba korrigálására képesek. A komplex hibajavító áramkörök ezzel szemben olyan kialakításúak, hogy 60 különböző stratégiával képesek hibajavítást végezni.

A hibajavító áramkörökben a legújabb VLSI áramkörökkel felépített gyors mikroprocesszorokat alkalmaznak. A gyakorlatban tehát nincs lehetőség arra, hogy a jelfeldolgozási folyamatba mérés-technikai módszerekkel beavatkozzunk. A legtöbb készüléknek azonban van olyan mérőpontja, amelyen az ún. "error flag bit"-ek szintje mérhető. Ezek a bitek arról tájékoztatnak, hogy van-e hiba, és hogy a hiba javítható-e vagy sem. A hibajavító áramkörök tesztelésére a nagyobb gyártók speciális mérőlemezeket bocsátanak forgalomba, amelyek a CD lemezekon előforduló leggyakoribb hibákat preparálják, ezek lehetnek: "ujjlenyomat", "karcolás", vagy "szennyeződés". A karcolásokból megkülönböztetnek kereszt-, és su-gárirányú karcolásokat, amelyekből az utóbbiak általában komolyabb gondot okoznak.

A hibajavító kimenetén jelenik meg - az adott kapcsolástechnikától függően soros vagy párhuzamos jel formájában - a D/A átalakító által már kiértékelhető PCM jel. Ez a PCM jel összekeverve tartalmazza a jobb és bal oldal csatornáinak



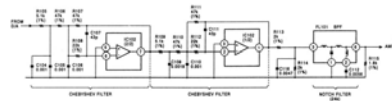
jelét. A D/A átalakító feladata, hogy a PCM jelből ismét PAM jelet képezzen. Ezek a PAM impulzusok a D/A kimenetén 22,7 ms-onként jelennek meg. Az átalakítási folyamat hibái miatt átalakító kimenőjele "glitche"-vel terhelt. (ábra)

A glitche a tranziens jelek felfutó élleinél létrejövő zavarcsúcsokat jelöli. Ennek megszüntetéséről egy glitchmentesítő áramkör gondoskodik, amely a PAM jelből 44,1 kHz frekvenciával ismét mintát vesz. Ezeknek a mintáknak a hossza valamivel rövidebb, mint az eredeti A/D átalakításé. A PCM jel PAM jellé történő átalakítása közben ismét járulékos zavarospektrum jön létre az alapsáv fölött. Annak érdekében, hogy ez a spektrum a további

erősítőfokozatban ne hozzon létre nemkívánatos keveréktermékeket, a felharmonikusokat egy aluláteresztő szűrővel leválasztják.

A CD játszóknak kimeneti szűrője

Arról már beszéltünk, hogy a digitális átalakítás során a mintavételi frekvenciára "tükrözve" az eredeti jel spektrumának tükröképei is megjelennek. (10. ábra) Ha az eredeti jel a 20 Hz-20kHz tartományban oszlik el, akkor a 44100 Hz-es frekvenciára tükrözve megjelenik ugyanez a tartomány, tehát a 20 kHz-es jel spektrális tükröképe 24100 Hz-nél fog megjelenni. Ha ezeket az összetevőket nem távolítjuk el maradéktalanul a hasznos jel fölül, akkor azok a mintavételi frekvenciával különbségi jelet képezve megjelennek a hallható tartományban és ún. "aliasing" torzítást okoznak. Ennek kiküszöbölésére a digitális technika őskorában analóg szűrőket használtak. Sajnos az a tartomány, amelyben a szűrőnek a digitális rendszerben biztosított 90 dB tartományt le kell vágnia, mindössze 4 kHz, szigorúan véve a határfrekvenciának (20000 Hz) mindössze egy ötöde, vagyis mindössze körülbelül egy terc. Sajnálatos módon nem csak az követelmény, hogy a csillapítás rendkívül meredek legyen, hanem az is, hogy a szűrő hatását ne éreztesse a hallható tartományban. A



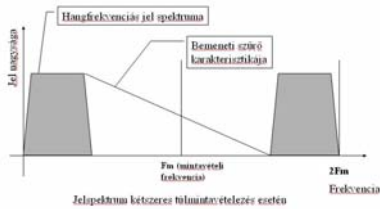
szűrő hatása kétféleképpen nyilvánulhat meg. Az egyik hogy bár a frekvenciamenet -3 dB-es pontja 20 kHz, de a frekvenciamenet lényegesen korábban, akár egy-két oktávval lejjebb már esni kezd. Ezt a problémát olyan többfokú szűrők használatával lehet kiküszöbölni, melyek együtthatóit ebből a szempontból optimalizálták. Tipikusan ilyenek a Csebisev szűrők. A másik gond, hogy az ilyen nagy meredekségű szűrők a magas frekvenciás fázismentet, és ezzel a térhatást elrontják. (ábra)

Cikkem írása közben előszedtem egy 1983-ban megjelentetett cikket a Hifi Magazinból. Ebben egy első generációs, digitális, VHS szalagra dolgozó magnót teszteltek. Fázismentete mindössze néhány kHz-ig lineáris, innentől a 20 kHz-es határfrekvenciáig fázisforgatása 360 fok. Ráadásul a szűrő nyilván nem lehetett még benne tökéletes, mert a különbségi hang mérése közben a mintavételi frekvenciával együtt volt hogy 17 %-nál nagyobb torzítási összetevők is megjelentek a magas frekvenciás tartományban. Ezek után szinte hihetetlennek tűnik, hogy analóg lemezjátszóról felvételt készítő vaktesztben is hosszas kapcsolgatás után tudtak csak különbséget tenni az eredeti és a digitális másolat között, és a térhatás várt romlása nem igazán következett be.

A túlmintavételezés

A nyolcvanas évek közepén a Philips cég vezetett be egy olyan eljárást, amely a bonyolult analóg szűrők alkalmazását feleslegessé tette. Ezen fejlesztés elsődleges célja eredetileg azonban nem ez volt. A CD lemez kifejlesztésben résztvevő Sony és a többi japán gyártó akkoriban már rendelkezett 16 bites D/A átalakítóval. Ezek valóban produkáltak a tőlük elvárható 96 dB-es dinamikát és jel-zaj arányt. A Philips cég azonban csak 14 bites processzorok gyártását tudta nagy szériában megvalósítani. Ezek azonban 12 dB-lel kevesebb, azaz 84 dB-es dinamikatarományal rendelkeztek.

Ez marketingpolitikai szempontokból megengedhetetlen volt. Létre kellett hozni egy olyan eljárást, amely kipótolja a hiányzó két bitet. Erre alkalmas a többszörös mintavételezési eljárás. (ábra)



A bevezetőben említett kvantálás, vagy kerekítés hozza létre a digitális rendszerekben a zajt, ilyenkor ugyanis az eredeti jeltől eltérő véletlenszerűen változó hibafeszültség jön létre, melynek spektruma egybeesik a bemenő jelével. Ha megnöveljük a mintavételezési frekvenciát, akkor ennek a zajnak a spektruma szélesebb lesz, de mivel a zaj mennyisége konstans, ezért a hallható tartományba

kevesebb esik belőle. A Philips első generációs készülékeiben négyszeres túlmintavételezést használtak. Ilyenkor a CD lemezre eredetileg rögzített minden egyes diszkrét minta közé további három mintát számolnak ki. Az eredeti analóg jel ismeretének hiányában természetesen nem tudjuk megállapítani, hogy ezeknek az új mintáknak mi lenne a pontos értéke, de a meglévő mintákat felhasználva interpolációval előállíthatjuk az új minták becslött értékét. Ha a mintavételezés kétszeres lenne, akkor a köztes mintát egyszerű átlagolással lehetne számolni. Négyszeres mintavételezés esetén geometriai szerkesztéssel lehet megállapítani az új minták nagyságát. Ilyenkor két szomszédos mintát egy képzeletbeli egyenessel összekötünk, és megnézzük, hogy ezt az egyenes az új mintavételezési időpontokban mekkora értéket jelöl. Ez az úgynevezett lineáris interpoláció. Természetesen az így kapott jel nem valami pontosan becsüli fel az eredeti jelalakot, hiszen az biztosan nem egyenes szakaszokból áll. Pontosabb becslést akkor kaphatunk, ha nem lineáris, hanem magasabb fokú hatványgörbével közelítjük az eredeti görbét. A magasabb fokú polinommal való számolás lényegesen bonyolultabb, mert távolabbi minták nagyságát is figyelembe veszi. Az első fokú interpoláció két, a másodfokú három, a harmadfokú négy minta értékét veszi figyelembe.

Az interpolációnak van még egy hatalmas előnye. Az interpolációs polinomok nem csak az amplitúdók (minták) nagyságára tartalmazhatnak előírásokat, hanem a futási idő karakterisztikára is. Ebben az esetben az interpoláló olyan digitális aluláteresztő szűrőként működik, amely mentes az analóg szűrők futásidő-hibáitól.

Két legyet ütöttünk tehát egy csapásra - csökkentettük a zajt, és ráadásul digitális szűrő kialakításával megszabadultunk az analóg szűrők gyakorlati megvalósításának problémájától.

A dolog szép is lenne, ha nem lenne egy további probléma. A digitális szűrők összeadásokat és szorzásokat végeznek. Ezek a műveletek az együttthatók hosszúságával megnövelik az eredeti jelek hosszúságát. A példánkban szereplő Philips eljárásnál a digitális szűrő 16 bites bemeneti jelét egy 12 bites együttthatóval kell kiegészíteni, így a szóhossz 28 bitre nő. Az ezzel végzett műveletek által jelentett további növekedést kerekítéssel levágják, ez megint csak megnöveli a zajt. Ennek eltávolítására a zajspektrum átalakítást használják. Ennek lényege, hogy a bemeneti szűrőben a 14 bites kimeneti jel csonkolásakor keletkezett maradékot az azt követő mintából kivonják. Ez az eljárás további 7 dB-lel csökkentette a 14 bites jel zajspektrumát, így a CD játzó kimeneti jele mért adatokra már megegyezett a 16 bites nem túlmintavételező átalakítókéval.

Mivel, mint már említettük, a túlmintavételezés tulajdonképpen olyan digitális szűrőként működik, amelynek nincs futásidő hibája, és amely eltávolítja a felső határfrekvencia és a megnövekedett mintavételezési frekvencia közötti jelcsoportokat, ezért további előny, hogy a kimeneti jel szűrésére már harmadfokú aktív szűrő is megfelel, melynek határfrekvenciáját elegendő 30 kHz kör-nyékére választani.

A 14 bites konverterek előállítására olcsóbb volt, így a Philips például egy tokba integrált két jelátalakítót használt. A távol keleti gyártók ezzel szemben már a kezdetben elegendően gyors (és drága) átalakítót tudtak gyártani ahhoz, hogy egyetlen D/A konvertert használjanak mindkét csatorna jelének átalakítására. A probléma azonban ilyenkor az, hogy a két jel átalakítása egymáshoz képest a mintavételezési periódussal eltolódva történik, tehát 20 kHz-es frekvencián a fázisforgatás az egyik csatornán 90 fokra nő. Ennek, és az alkalmazott analóg szűrők hibáinak ellensúlyozására a japán gyártók később a dekóder és a D/A átalakító között egy digitális futásidő korrekort helyeztek el. Ezt szintén kombinálni lehetett a zajspektrum átalakítással. Így a műszaki paraméterek, és a hang szépen lassan tovább javult.

Az interpolációs eljárásnak megvan az az előnye, hogy a digitális szűrő kimenetén a csonkolást úgy is el lehet végezni, hogy a kapott jel nagyobb felbontású legyen, mint az eredeti. Tehát minden további nélkül hozzájuthatunk 18, 20 vagy akár 24 bites hangmintákhoz is, azzal a kegyes csalással, hogy a kisebb lépcsők mintái nem valóságosak, hanem számítással állnak elő. Ahhoz azonban, hogy a hangminőség és a műszaki adatok javuljanak, arra is szükség van, hogy az átalakítók precizitása is nőjön. Hiba lenne azonban azt gondolni, hogy attól, hogy a jel továbbítása és tárolása digitálisan történik, attól a különböző D/A konverterek is egyformák. A sokbites jelátalakítók jóságát az határozza meg, hogy a konvertálásnál alkalmazott ellenállások és félvezetők milyen tűréssel készülnek el. Egy 16 bites átalakítónál ki kell várni, amíg a villamos kiegyenlítődesi folyamatok 1/65536-nyi, azaz 0,00152 % pontossággal be nem állnak. Az alkatrészek tűrésének tehát ettől egy nagyságrendnyivel jobbnak kell lennie. Ilyen szempontból érthetővé válik, hogyan lehetséges, hogy amikor a Philips első 16 bites konverterei piacra jöttek, mindenki egyértelműen kijelentette, hogy a régebbi 14 bites átalakítók jobbnak szóltak. A további generációk hangja azután már javult.

A hangminőség javulása azonban nem csak a felbontás növelésével érhető el.

A D/A konverterek olcsóbbodásával "igényes konstrukciókban" az alkalmazott konverterek számát is növelték. Lehet használni négy párhuzamos konvertert, amikor is két-két konverter szimmetrikus jelet állított elő. A jelátalakítóban a tápfeszültség ingadozásának hatására létrejövő hibák ilyenkor közös módusú jelként jönnek létre, így aszimmetrizálás után azok kioltódnak. De még ez sem minden. Vannak olyan gyártók, akik nyolc D/A konvertert használnak. Ilyenkor az előbbi eljárást még azzal kombinálják, hogy egy konverter a jelalaknak csak egy-egy félperiódusát dolgozza fel.

Különösen a nyolcvanas évek végén terjedt el az a megoldás, hogy a CD játszókhöz külső D/A konvertereket ajánlottak. Ezeknek azért volt nagy jelentősége, mert a jelátalakítók piacán a gyártó cégek átlagosan 3 évenként dobtak piacra egy-egy újabb típust, és ezek jóval olcsóbbak voltak egy jól kivitelezett mechanikával rendelkező futóműnél. Érdekes, hogy napjainkban a külső jelátalakítók szinte teljesen eltűntek. Ennek oka valószínűleg az, hogy napjainkban, a futóművek hangminőségében nagyobb szórás tapasztalható, mint a jelátalakítókéban, ez előbbieket viszont sokkal drágábbak, tehát nem érdemes csereberélni őket. Ráadásul itt felmerül a kábelezés problémája is. A berendezéseket összekötő digitális kábelek ugyanis ugyanúgy érzékelik hatásukat a hangminőségre, mint az analóg szakaszban, sőt az sem mindegy, hogy optikai, vagy koaxiális kábelezést használunk (az általános tapasztalatok szerint az utóbbiak jobban beválnak).

A kevésbites átalakítók

A sokbites D/A konverterek felbontásának növelésének tehát határt szab a mindenkori alkatrésztechnika elérhető pontossága. Tehát a konverterek felbontását nem érdemes minden határon túl növelni. Akkor milyen eljárással lehet fokozni a már meglévő digitális jel pontosságát? Képzeljünk el egy olyan átalakítót, amelynél a túlmintavételezés nagyságát növeljük. A 14 bites átalakítókról leírtakból tudhatjuk, hogy ha növeljük a mintavételezést, csökkenteni lehet a digitális átalakító felbontását. Képzeljük el, hogy a túlmintavételezési frekvenciát olyan nagyra választjuk, amikor már 1 bites átalakítók is elegendőek. Ilyen egybites átalakítókat már korábban is használtak az ún. különbségi pulzuskód modulációban (DPCM: Differential Pulse Code Modulation). Ebben nem a jel nagyságának pillanatnyi értékét, hanem annak változását kódolják. Ha emelkedik a jel, akkor 1, ha csökken, akkor 0 a kód. Ez az egyszerű DPCM akkor lenne egyenértékű a lineáris PCM-mel, ha a mintavételezési frekvenciát $216 \times F_m = 65536 \times 44100 = 2890$ MHz-re választanánk. Ilyen nagy frekvencián működő áramkör létrehozása nagy nehézségekbe ütközik, de mint a továbbiakban ki fog derülni, megfelelő eljárással még alacsonyabb mintavételezési frekvenciával rendelkező 1 bites átalakítók is jobb eredményt képesek szolgáltatni, mint a sokbites rendszerek.

A megnövekedett túlmintavételezés a rendszer zaját nagymértékben csökkenti, de a kis felbontású átalakító előtti kerekítés igen durva hibát, zajt, torzítást vinne a jelbe, ezért zajspektrum-átalakítással építik egybe. Ennek lényege a következő:

Építsünk be az átviteli szakaszba a kerekítő (kvantáló) áramkör elé egy integrátort. Ennek erősítése kis frekvencián több ezerszeres, nagy frekvenciák felé monoton 6 dB/oktávval csökken. Tulajdonképpen úgy viselkedik, mint egy műveleti erősítő nyílt hurokban, amelynek első töréspontját rendkívül alacsonyra választották. Ez az elsőfokú integrátor. Az eljárás hatásosságát növelhetjük, ha másod-, harmad-, stb. fokú integrátorokat használunk. Mi lesz a jellel egy ilyen erősen eső karakterisztikájú erősítőben? Önmagában természetesen nagy hibát okozna, de a jelet a kerekítő kimenetéről visszacsatoljuk az integrátor bemenetére. A visszacsatolás a kimeneti jelet teljes egészében visszavezeti a bemenetre. Ez tehát egy rendkívül erős visszacsatolás. Az ilyen visszacsatolt erősítőben az eredő erősítést a visszacsatolási tényező reciproka határozza meg. Minthogy a visszacsatolás egységnyi, az eredő erősítés is egységnyi lesz, vagyis független az integrátor frekvenciafüggő erősítésétől.

Mi a helyzet a zajjellel és a torzítással? A zaj és a torzítás forrása a kvantáló, amely magában a hurokban helyezkedik el. A hibajelre nézve az erősítést szintén az erősítés reciproka határozza meg, amely nagyságára nézve az alacsony frekvencián ezreléknyi, és csak a hallható tartományon kívül közelíti meg az egyet. Ezért az áramkör az eredetinek töredékére csökkenti a kerekítéssel okozott zajt a fülünk szempontjából érzékeny frekvencia-tartományban.

Van még egy módszer a felbontás javítására, ez pedig a zajmoduláció. A digitális jelátvitelben a kvantálás a kis jelek szintjén durva hibát képez. Ezeket a lépcsőket a kimeneti simító szűrő ugyan kisimítja, de a torzítás így is megmarad. A torzítás csökkentésére egy nagyjából az elemi lépcső méretének megfelelő zajjelet adnak a hasznos jelhez. Ez ugyan rontja a jel/zaj viszonyt, de véletlenszerű pillanatértékével sűrűbb lép-csőváltozásokat eredményez, így a jel torzítása gyakorlatilag megszűnik. Természetesen izlés kérdése, hogy kit mi zavar jobban, a torz jelátvitel, vagy az árnyalatnyival magasabb zaj. A gyakorlatban a környezet zaja miatt ez utóbbi kevésbé zavaró. Túlmintavételező rendszerekben a moduláló zajjelet úgy is meg lehet választani, hogy az ne tartalmazzon összetevőket a hasznos frekvenciasávban. Ultrahangú zajjellel tehát úgy szüntethetjük meg a digitális jel lépcsőzöttségét, hogy ennek ne legyen hallással érzékelhető, hátrányos következménye. Arról ne feledkezzünk meg, hogy ezek az eljárások nem csökkentik az eleve a jellel érkező zajt és torzítást.

A Technics MASH rendszerű átalakítója

A Technics cég MASH fantázianevű D/A átalakítójának neve a Multi-StAge noise Shaping = többfokozatú zajformálás névre hallgat. Az áramkör 44,1 kHz, 16 bit felbontású jelet fogad. Az átalakító bemenetén két fokozatból összeállított négyszeres túlmintavételező szűrőt találunk. Ennek kimenetén 176,4 kHz mintavételezési frekvenciájú, 18 bites jel jelenik meg, s azt egy összetett, két fokozatból álló zajspektrum-átalakító dolgozza fel. Az elsőrendű integrátort tartalmazó spektrum-átalakító a 18 bites, azaz 262 144 lépcsőt képező jelet további 8 szoros túlmintavételezéssel hétlépcsős kimenőjellel alakítja át. A kvantálási hibajelet (amely a kis amplitúdójú jeleket szimbolizálja) egy másodrendű (tehát két integrátort tartalmazó) spektrum-átalakítóba vezetik, amely ötlépcsős kimeneti jelet állít elő. Ez differenciálás után a hét lépcsőhöz hozzáadva egy összesen 11 lép-cső kimeneti jelet eredményez, melynek mintavételezési frekvenciája $32 \times 44100 = 1.412$ MHz. A kiadott minta 11 lépcsője szélességmodulált impulzusként (Pulse Width Modulation) jelenik meg a kimeneten.

Hogyan lesz a hét meg öt lépcsőből tizenegy? Ennek magyarázata egyszerű. A lép-cső egy középértékhez képest képződnek, tehát az öt lépcső -2, -1, 0, +1, +2 számértékeket jelent, a hét pedig a -3 - +3-as tartományt öleli fel. A tizenegy lépcső $\log(11) = 3,3$ bit felbontásnak felel meg.

A MASH konverterekben tehát a kimeneti impulzusok szélességét változtatják. A modulátor egy olvasható memória

(ROM) mely a különböző szélességű impulzusok létrehozásához szükséges bitsorozatokat tartalmazza. A zajformáló szűrők összegjele a ROM rekeszeit címzi, aminek hatására a ROM soros adatkimenetén egymás után megjelennek az eredeti analóg jelnek megfelelő különböző szélességű impulzusok. Ha az impulzussorozatot egy ellenállásból és kondenzátorból álló aluláteresztő (RC) tagra vezetik, akkor a pozitív feszültségű impulzusok növelik a kondenzátor értékét, a negatív értéknek megfelelő impulzusok közötti szünetek pedig csökkentik a kondenzátor feszültségét. A konverter tehát maga a kimeneti integrátor.

Philips "BitStream"

A belső felbontás tekintetében még ennél is szélsőségesebb átalakítóval jelentkezett a Philips 1987-ben. BitStream fantáziánévre keresztelt átalakítója mindössze 1 bites volt. Ezt az áramkört eredetileg az analóg-digitális átalakítás számára találták fel (még 1962-ben), de tisztán digitálisan is könnyen megvalósítható.

A BitStream átalakító felépítése a következő. A jelet először négyszeresen, majd ezután még hatvannégyszeresen mintavételezik, ennek eredményeképpen egy 11,2896 MHz-es 17 bites jelsor áll elő. A második túlmintavételezés után digitális zajmodulációt adnak a jelhez, ezzel a visszacsatolt lépcsőfüggvény okozta begerjedési hajlamot szüntetik meg. A másodrendű zajspektrum-átalakítóval megvalósított delta-sigma modulátor állítja elő az egybites, ellenfázisú kimeneti jelet. Ez utóbbit azt kell érteni, hogy az 1-es jelnél pozitív, a 0-ás jelnél azonos abszolút értékű, de negatív feszültséget ad ki az átalakító. Így lényegében egy impulzussűrűség-modulált jelet kapunk. Ez a kapcsolat tehát pulzussűrűség modulátornak is tekinthető (PDM: Pulse Density Modulation)

Ma már többen gyártanak 1 bites jelátalakítókat, szélsőségesebb adatokkal, mint a Philips első generációs "BitStream" konvertere volt. Például a Sony saját szintén delta-sigma modulációs eljárással dolgozó egybites konvertere 45 bites belső szóhosszúsággal és 45 MHz-es órajellel dolgozik.

Az egybites konvertereket is kíváncsian tesztelte a szakcsaját. Az első generációs BitStream konverterről megállapították, hogy lesz még mit dolgozni rajta: bár az apró részleteket és a térakusztikát nagyon szépen hozta, a multibites konverterek sokkal elevenebbek, dinamikusabbak voltak. Ez a különbség az én tapasztalataim szerint mind a mai napig megmaradt. Az egybites jelátalakítók bár sokat javultak, dinamikában, lendületességben, a jobb minőségű sokbites konvertereket nem érik el. Sokaknak ettől függetlenül jobban tetszik lágyabb, talán hallgathatóbb karakterük.

Hogyan tovább?

A fenti kérdés a jövőbeli audio CD formátumra utal. Az 1980-ban bevezetett (jelenlegi) CD lemezek tárolókapacitása 650 Mbyte. Az 1995-ben véglegesített DVD (Digital Versatile Disc, azaz sokoldalú digitális lemez) tárolókapacitása ezzel szemben már 4,7 Gbyte, tehát a korábbiak körülbelül hétszerese, adatátviteli sebessége is lényegesen nagyobb. Lehetőség támadt hát egy új szabvány létrehozására, ennek lehetünk tanúi napjainkban. Több lehetőség is fennáll. Szó van arról, hogy a DVD-Audio 96kHz - 24 bites formátumát vezessék be, esetleg ettől többet, vagy kevesebbet (akár felbontásban, akár mintavételezésben), de az is lehetséges, hogy ismét a két nagy multinacionális cég, a Sony-Philips ajánlása a Super Audio CD fut be.

A DVD-Audio egy olyan lemezformátum, amely a DVD-nél elfogadott formátumot használják ugyanolyan lineáris PCM jelfeldolgozással, mint korábban a CD lemeznél, csak lényegesen jobb felbontással. Bár a DVD lemez is 1,2 mm vastag, de az információ réteg a lézersugár beesési pontjától 0,6 mm-re van. Ez a kisebb hullámhosszú lézerdíódák alkalmazása miatt van így. A kétrétegű lemezeknél a második réteg 1,2 mm-re van, de ilyenkor át kell állítani a lézersugár fókusztávolságát. Egy igen jó minőségű, tömörítetlen audio lemez céljára az egyrétegű DVD tárolókapacitása is elegendő lenne. Természetesen felmerül annak lehetősége is, hogy valamilyen több csatornás audio rendszer lehetőségét is megteremtsék.

A Super Audio CD ugyanazon két multinacionális cégtől származik, akik annak idején a mostani CD lemezeket is szabványosították: a Sonytól és a Philipstől. A Super Audio CD kétrétegű. A lemez középvonalában - 0,6 mm-re - lévő síkra helyeznék el a nagyobb felbontású anyagot, az 1,2 mm-re lévő réteg pedig normál CD-ként teszi használhatóvá, ugyanis a középső réteg a hosszabb hullámhosszúságú lézer számára átlátszó. Ezzel megoldanák azt a problémát, hogy a frissen megjelenő lemezeket nem kell külön CD-ként és Super Audio CD-ként is piacra dobni, mert az utóbbit lejátszák a régebbi (mostani) lejátszók is.

A Super Audio CD középső rétegére nem sokbites PCM, hanem 1 bites átalakítóval létrehozott jelet visznek fel. Ezen eljárás alapját a DSD (Direct Stream Digital, azaz közvetlen digitális adatfolyam) technológia jelenti. Ennek a technológiának az alapja sem új. Amikor a Philips első BitStream konverterét bemutatta, létrehozták az egybites Delta-Sigma átalakítóknak egy stúdiókban használható analóg-digitális átalakító változatát is, amellyel mind a mai napig készítenek felvételeket, és amelyekről már akkoriban hangsúlyozták, hogy a normál CD játszó egy bites konverterei az így készült felvételekkel tudnák igazán azt a minőséget biztosítani, amelyre képesek. A DSD technológia egy olyan egybites átalakító, amely 64-szeres túlmintavételezéssel dolgozik (2,8224 MHz), de van egy 128-szoros és egy 32-szeres túlmintavételező verziója is (5,6448 ill. 1,4112 MHz). A DSD frekvencia átviteli tartománya 0-100 kHz. Ennek alapján egy olyan sokbites rendszernek felel meg, amelynek mintavételi frekvenciája 200 kHz. Természetesen ezekben a rendszerekben is alkalmazták a zajmodulációt és a zajspektrum-átalakítást, ennek következtében a rendszer 120 dB jel-zaj arányt és dinamikatartományt biztosít a 0-20 kHz-es frekvencia tartományban (kivéve a 32-szeres túlmintavételező verziót). Ez sokbites rendszerre átszámolva 20 bit felbontást jelent. Az eljárás nagy előnye, hogy nincs szükség olyan mértékben a bemenő jel frekvenciájának határolására, mint a sokbites rendszereknél.

A Super Audio CD mellett szól az, hogy a jelenleg forgalomban lévő CD játszó nagy részében a gyártók amúgy is egybites átalakítókat használnak. Ha a rögzítési formátum nem sokbites, akkor meg lehet takarítani az egybites jelből sokbitesbe - és vissza - való alakítás sokszor bonyolult és a hangminőségre is kiható folyamatát.

Természetesen ezeket a dolgokat a piaci viszonyok fogják eldönteni, de azt nyugodtan kijelenthetjük, hogy a digitális hangtechnika visszatérhetetlenül tör előre, és minősége is egyre jobb lesz.

