

## 2 Hang- és képjelek digitalizálása

A hang- és képjelforrások, pl. mikrofon és kamera, időben folytonos, határozatlan szinttartományú jeleket szolgáltatnak. Ezeket az un. analóg jeleket a digitális jelfeldolgozás miatt mintavételezéssel időben diszkrét jelekké kell alakítani. A mintavételezést megelőzően az analóg jelek sávszélességét előszűréssel meghatározott értékre korlátozzák. A diszkrét jeleket azután kvantálják és kódolják. Az előszűrést, a mintavételezést, a kvantálást és a kódolást együtt analóg-digitális átalakításnak hívjuk. A felsorolt műveleteket megvalósító eszköz az analóg-digitális átalakító. Az analóg jelek visszanyerése digitális-analóg átalakítókkal történik.

A digitális jelfeldolgozás során a jeleket soros vagy párhuzamos bitátvitellel továbbítjuk. A bitfolyamot egyéb digitális jelekkel egészíthetjük ki, mint pl. a szinkronizációt megkönnyítő jelek stb.

### 2.1 Mintavételezés és kvantálás

A mintavételi frekvenciát a mintavételi tétel alapján határozhatjuk meg, miszerint a mintavételi frekvenciának legalább kétszer akkórának kell lennie, mint az analóg, alapsávi jelben előforduló legnagyobb frekvenciaösszetevő. Ez esetben nem lesz a mintavett jel spektrumában spektrumátfedés, azaz nem lép fel az un. alias-effektus.

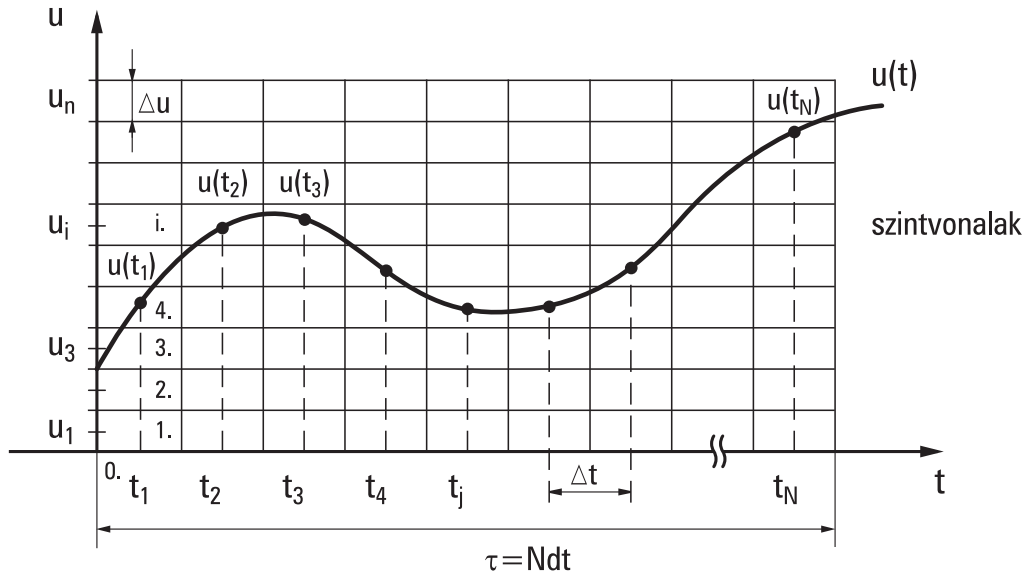
Ezért az analóg jelekre előszűrést kell alkalmazni. Többnyire a mintavételi frekvenciát az alapsávi jelben előforduló maximális frekvencia kétszeresénél nagyobbra választják, hogy az alapsávi spektrum és ennek ismétlődő spektrumösszetevői egymástól minél távolabbra kerüljenek a szűrőmegvalósítás egyszerűbbé tétele érdekében.

Az analóg jel digitalizálásakor alkalmazott feszültséglépcsők száma meghatározza a digitalizálás amplitúdófelbontását. A  $b$  bitértékű bináris kód lineáris kódolásnál  $2^b$  azonos nagyságú kvantálási lépcsőt jelent. Az ezáltal elérhető szinttartományt lefelé a kvantálási hiba, felfelé az analóg-digitális átalakító határolása szabja meg, mert a kvantálási jelleggörbe által meghatározott maximális értékű analóg jelnél nagyobb az átalakító nem képes kódolni. Ezzel a szinttartománnyal definiáljuk az un. rendszerdinamikát.

A rendszerdinamikának megfelelő jel-zaj viszonyt a kvantálási zaj, ill. a jel teljesítményének ismeretében határozhatjuk meg. A videojel és a hangjel is sztochasztikus jel, melyek spektruma és időfüggvénye is véletlenszerű. Ezért ilyenkor a teljesítményeket az időben állandó sűrűségfüggvényből számítjuk.

### 2.2 Elsőrendű és négyzetes átlag számítása a sűrűségfüggvényből

A kitűzött cél érdekében osszuk fel a jel feszültség- és időtartományát a 2.1. ábrán látható módon:



2.1. ábra  
Feszültség- és az időtartomány felosztása

Az elsőrendű átlagfeszültség az  $u(t_1) \dots u(t_N)$  feszültségek számtani közepe:

$$U_{\text{átl.}} = \frac{u(t_1) + u(t_2) + \dots + u(t_N)}{N} . \quad (2.1)$$

Csoportosítsuk a számlálóban lévő feszültségeket úgy, hogy két szintvonal közötti értékek alkossanak egy csoportot. Az  $i$ -edik csoportba vagy sávba tartozó feszültségértékek számát jelöljük  $k_i$ -vel (Pl.  $k_4 = 3$ ). A rajz alapján írható, hogy

$$\sum_{i=1}^n k_i = N. \quad (2.2)$$

A csoport tagjainak feszültségét  $u_i$ -vel vesszük figyelembe, ami  $\Delta u \rightarrow 0$  esetén egyre jobban megközelíti a valódi értéket. Ezek után az elsőrendű átlagfeszültség a következő módon is írható:

$$U_{\text{átl.}} = \frac{k_1 u_1 + k_2 u_2 + \dots + k_n u_n}{N} = \frac{k_1}{N} u_1 + \frac{k_2}{N} u_2 + \dots + \frac{k_n}{N} u_n , \quad (2.3)$$

ill.

$$U_{\text{átl.}} = \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{N} u_i . \quad (2.4)$$

(2.4)-ben  $k_i / N$  elegendően nagy  $N$  esetén az  $i$ -edik  $\Delta u$  sávba esés valószínűségét,  $\Delta P(u_i) - t$  adja meg.  $\Delta P(u_i)$  arányos  $\Delta u$ -val és egy  $u_i$ -től függő arányossági tényezővel, amit jelöljük  $p(u_i)$ -vel:

$$\Delta P(u_i) = p(u_i) \Delta u . \quad (2.5)$$

Ezzel  $U_{\text{átl.}}$ -ra azt kapjuk, hogy

$$U_{\text{átl.}} = \sum_{i=1}^n p(u_i) \Delta u u_i = \sum_{i=1}^n p(u_i) u_i \Delta u . \quad (2.6)$$

Ha  $\Delta u \rightarrow 0$ , akkor az elsőrendű átlag:

$$U_{\text{átl.}} = \int_0^{u_n} p(u) u du . \quad (2.7)$$

(2.7)-ben  $p(u)$  az un. sűrűségfüggvény, amelynek  $u$  helyen felvett értékét  $du$ -val megszorozva megkapjuk a feszültség ( $u, u + du$ ) intervallumba esésének valószínűségét. Most szorozzuk meg (2.1) számlálóját és nevezőjét  $\Delta t$ -vel:

$$U_{\text{átl.}} = \frac{u(t_1)\Delta t + u(t_2)\Delta t + \dots + u(t_N)\Delta t}{N\Delta t} = \frac{1}{\tau} \sum_{j=1}^N u(t_j)\Delta t , \quad (2.8)$$

ahol  $\tau = N\Delta t$ .

$\tau \rightarrow \infty$ , és  $\Delta t \rightarrow 0$  esetén az elsőrendű átlag:

$$U_{\text{átl.}} = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} u(t) dt , \quad (2.9)$$

ami nem más, mint az egyenközép. Tehát az egyenközépet (2.7) szerint akár a sűrűségfüggvényből, vagy (2.9) szerint, akár az időfüggvényből számíthatjuk. Ezek után határozzuk meg az  $u^2(t)$  jel átlagát, azaz a négyzetes középértéket:

$$(U^2)_{\text{átl.}} = \frac{u^2(t_1) + u^2(t_2) + \dots + u^2(t_N)}{N} = \frac{k_1}{N} u_1^2 + \frac{k_2}{N} u_2^2 + \dots + \frac{k_n}{N} u_n^2 , \quad (2.10)$$

hiszen az egyes sávokba eső feszültségek darabszáma nem változott meg, csupán az  $u_i$  sávból áthelyeződtek annak négyzetébe. (A függőleges tengelyre most  $u^2$ -et vesszük fel.) Tehát a  $p(u)$  sűrűségfüggvény változatlan. Így végül az előbbieket mintájára:

$$(U^2)_{\text{átl.}} = \int_0^{u_n} p(u) u^2 du , \quad (2.11)$$

ill. az időfüggvényből meghatározva:

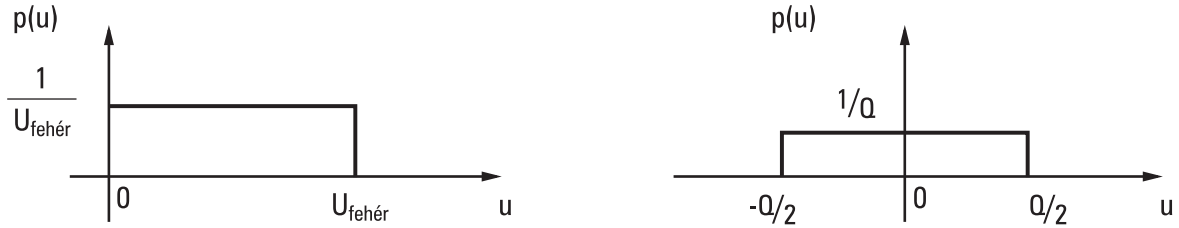
$$(U^2)_{\text{átl.}} = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} u^2(t) dt , \quad (2.12)$$

ami nem más, mint az 1 ohmos ellenálláson az átlagteljesítmény, azaz a teljesítmény középértéke, ha az ellenállás feszültsége  $u(t)$ . Azaz az átlagteljesítmény is számítható a jel sűrűségfüggvényének ismeretében, ahogyan az effektív érték is, mert

$$U_{eff} = \sqrt{(U^2)_{\text{átl.}}} . \quad (2.13)$$

Megjegyzendő, hogy a (2.7) és (2.11) összefüggéseknél az integrálási határok elvileg  $-\infty$ -tól  $+\infty$ -ig terjedhetnek, hiszen a felvázolt számítási eljárásnál a függvényértékek bármekkoraak lehetnek.

Ahhoz, hogy a (2.7) és (2.11) összefüggéseket alkalmazni tudjuk, ismerni kell a sűrűségfüggvényt. Videojelre és általában a kvantálási zajra egyenletes kvantálásnál azt kapták, hogy azok a 2.2. ábrán látható egyenletes eloszlású valószínűségi változóknak tekinthetők.



2.2. ábra  
Videojel és a kvantálási zaj sűrűségfüggvénye

((2.2) átrendezésével  $\sum_{i=1}^n \frac{k_i}{N} = 1$ , amiből következik, hogy  $\int_{-\infty}^{\infty} p(u) du = 1$ . Ez a 2.2. ábra mindkét sűrűségfüggvényére teljesül!)

Ezek után határozzuk meg a videojel egyenközépét és effektív értékét:

$$U_{\text{átl.}} = \int_0^{U_{\text{fehér}}} \frac{1}{U_{\text{fehér}}} u du = \frac{1}{U_{\text{fehér}}} \left[ \frac{u^2}{2} \right]_0^{U_{\text{fehér}}} = \frac{U_{\text{fehér}}^2}{2U_{\text{fehér}}} = \frac{U_{\text{fehér}}}{2} , \quad (2.14)$$

$$U_{eff} = \sqrt{(U^2)_{\text{átl.}}} = \sqrt{\int_0^{U_{\text{fehér}}} \frac{1}{U_{\text{fehér}}} u^2 du} = \sqrt{\frac{1}{U_{\text{fehér}}} \left[ \frac{u^3}{3} \right]_0^{U_{\text{fehér}}}} = \frac{U_{\text{fehér}}}{\sqrt{3}} . \quad (2.15)$$

Hasonlóan számíthatjuk ki a kvantálási zaj effektív értékét is:

$$U_{kv.z.eff} = \sqrt{\frac{1}{Q} \int_{-Q/2}^{Q/2} u^2 du} = \sqrt{\frac{1}{Q} \left[ \frac{u^3}{3} \right]_{-Q/2}^{Q/2}} = \frac{Q}{\sqrt{12}} , \quad (2.16)$$

ami egyben a kvantálási zaj AC-komponensének effektív értéke is, mivel az egyenközép 0. A kvantálási jel-zaj viszony most már könnyen meghatározható. Pl. videojelre a szokásos definíció:

$$\left. \frac{U_{v.}}{U_{kv.z.}} \right|_{dB} = 20 \lg \frac{U_{v.cs.cs.}}{U_{kv.z.eff}} = 20 \lg \frac{(2^b - 1)Q}{Q/\sqrt{12}} \approx 20 \lg 2^b \sqrt{12} = 6,02b + 10,8 , \quad (2.17)$$

ahol  $b$  a bináris kód bitszáma,  $U_{v.cs.cs.}$  a videojel értéke csúcstól csúcsig.

Hangjelre a számítás egyetlen szinuszos hangjel esetén a következő:

$$\frac{U_{h.}}{U_{kv.z.}} \Big|_{dB} = 20 \lg \frac{U_{h.eff}}{U_{kv.z.eff}} = 20 \lg \frac{(2^b - 1)Q}{\frac{2\sqrt{2}}{Q/\sqrt{12}}} \approx 20 \lg 2^b \sqrt{1,5} = 6,02b + 1,76, \quad (2.18)$$

ahol  $U_{h.eff}$  a szinuszos hangjel effektív értéke.

## 2.3 Videojelek digitalizálása

Az ITU (International Telecommunication Union) 601 ajánlása szerint az R, G, B, ill. az Y alapsávi jelekre a mintavételi frekvencia 13,5 MHz, amely a vezeték nélküli átvitelre előírányzott 8 bites felbontással ezen jelek mindegyikére  $v = 108$  Mbit/s adatsebességet jelent. A  $C_B$ ,  $C_R$  színkülönbségi (krominancia-) jelek mintavételi frekvenciája 6,75 MHz, és így az adatsebességük is csak 54 Mbit/s.

A 13,5 MHz-es mintavételi frekvencia úgy a 625 soros, mint az 525 soros szabványban a sorfrekvencia egész számú többszöröse, és mindkét szabványban az „aktív” soridő 720 mintavételi periódusból áll. RGB-átvitel esetében (un. 4:4:4-es formátum) a teljes adatsebességre  $v_{össz.} = 324$  Mbit/s adódik, ill. Y,  $C_B$ ,  $C_R$  -átvitel (4:2:2-es formátum) esetében a krominanciajelek kisebb mintavételi frekvenciájának következtében  $v_{össz.} = 108 + 2 \cdot 54 = 216$  Mbit/s. A 2.1. táblázat a két formátum adatait foglalja össze.

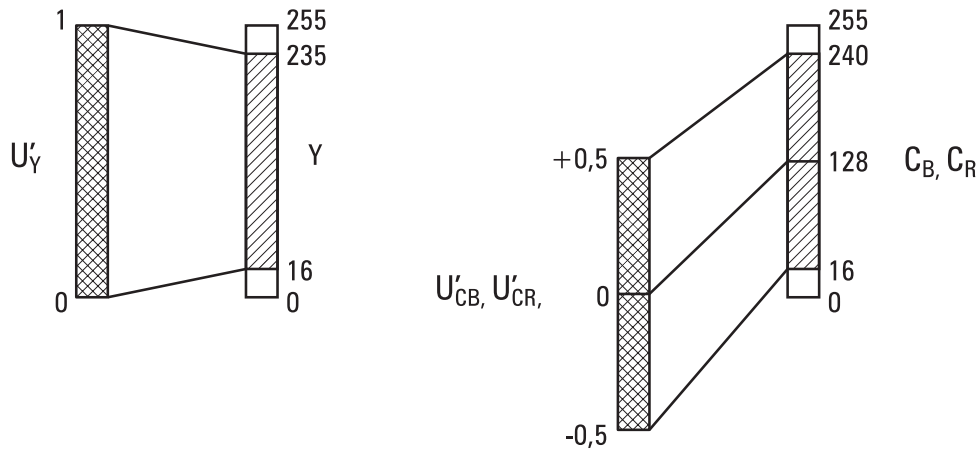
### 2.1. táblázat

Videojelek digitalizálásának jellemzői [ITU 601]

Jelek	Mintavételi frekv.[MHz]	b [bit]	v [Mbit/s]	V <sub>össz.</sub> [Mbit/s]	Formátum
R	13,5	8	108	324	4:4:4
G	13,5	8	108		
B	13,5	8	108		
Y	13,5	8	108	216	4:2:2
C <sub>B</sub>	6,75	8	54		
C <sub>R</sub>	6,75	8	54		

A stúdiókban és berendezésekben lehetőség van a 10 bites jelfeldolgozásra is, aminek következtében az adatsebességek nagyobbak lesznek. Újabban a 16:9-es képméretű átvitel számára a 18 MHz-es mintavételi frekvenciát javasolják, hogy az ehhez a képméretarányhoz illeszkedő vízszintes felbontás megvalósítható legyen. Ezáltal az adatsebességek is a korábbiak 4/3-szorosára nőnek.

Az analóg jeleknek digitális Y-,  $C_B$ -,  $C_R$ -jelekké történő átalakítására szánt szinttartomány kisebb, mint a rendszerdinamika, ahogy az a 2.3. ábrán is látható.



2.3. ábra

Y-, C<sub>B</sub>-, C<sub>R</sub>- komponensjelek dinamikatartománya

A 0 és a 255-ös érték kizárólag a szinkronjelek kódolására van tartalékolva. A túlvezérlésvédelem célját szolgálják a szinttartományok alsó és felső végén található kvantálási szintek (1...16, 235...254, ill. 1...16 és 240...254), az Y' világosságijelnél eltolás nélkül, a bipoláris krominanciajeleknél a rendszerdinamika felének megfelelő eltolással. A szinttartományok korrekt kitöltése szigorú feltételeket szab az analóg videojelek szintjeire, amelyeket az A/D átalakítók előtti szintrögzítők és szabályozó-áramköröknek kell az előírt határok között tartaniuk.

A 2.3. ábra alapján meghatározhatjuk az  $U'_{CR}$  és az  $U'_{CB}$  jelekre alkalmazandó korrekciós (vagy skála-) tényezőket. A videojelek  $\gamma$ -korrigált értékeit a szokásos módon most is vesszővel jelöljük. Ha a 100 %-os fehérenél  $U'_Y = 1V$ , akkor  $U'_R = U'_G = U'_B = 1V$ . Így a 100 %-os intenzitású vörös-nél és kéknél a színkülönbségi jelek az  $U'_Y = 0,3 U'_R + 0,59 U'_G + 0,11 U'_B$  összefüggést figyelembe véve:

$$U'_R - U'_Y = 1 - 0,3 = 0,7 [V], \quad (2.19)$$

és

$$U'_B - U'_Y = 1 - 0,11 = 0,89 [V]. \quad (2.20)$$

A korrekciós tényezőkre pedig a 2.3. ábra alapján az alábbi összefüggések írhatók fel:

$$U'_{CR} = k_{CR} (U'_R - U'_Y) = k_{CR} 0,7 = 0,5, \quad (2.21)$$

$$U'_{CB} = k_{CB} (U'_B - U'_Y) = k_{CB} 0,89 = 0,5. \quad (2.22)$$

(2.21)-ből és (2.22)-ből

$$k_{CR} = \frac{0,5}{0,7} = 0,713, \quad (2.23)$$

$$k_{CB} = \frac{0,5}{0,89} = 0,564. \quad (2.24)$$

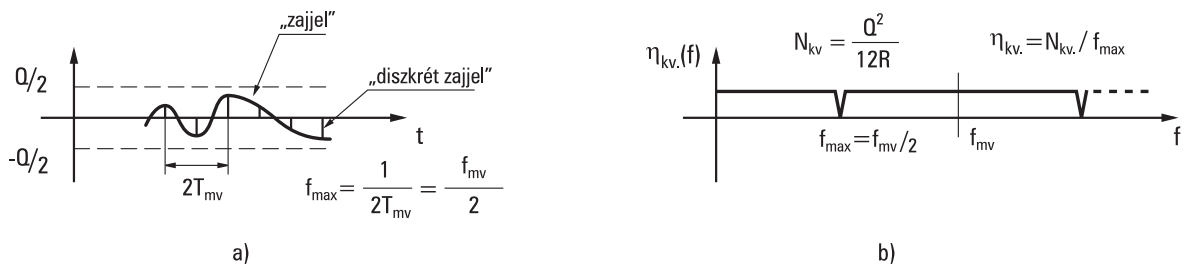
Tehát végül

$$U'_{CR} = 0,713 (U'_R - U'_Y), \quad (2.25)$$

és

$$U'_{CB} = 0,564 (U'_B - U'_Y). \quad (2.26)$$

A kvantálás következtében a rekonstruált jelek zajossá válnak. A jel-zaj viszonyt a (2.17)-es összefüggéssel határozhatjuk meg, ha a mintavételi frekvencia pont kétszerese az alapsávi spektrum felső sávhatarának, ill. ha a teljes kivezérlési (kvantálási) tartomány kihasznált. Egyik feltétel sem teljesül sem az Y', sem a krominanciajelek digitalizálása során, ezért a (2.17) kifejezést korrigálni kell. A 2.4.a) ábrán a kvantálás során keletkező „zajminták” (a diszkrét jel és a kvantált jel különbsége) és a hozzájuk rendelhető időfüggvény („zajjel”) van feltüntetve, a b) ábrán pedig a zajmintákhoz tartozó spektrum. Mint látható, a zajjelben és a zajjel spektrumában előforduló legnagyobb frekvenciájú komponens frekvenciája  $f_{\max} = f_{mv}/2$ . Mivel a zajspektrum egyenletes sűrűségűnek tekinthető, az  $f_{\max}$ -nál kisebb sáv szélességű jelekre kisebb zajteljesítmény jut, mint  $Q^2/12R$ , mert ez a teljesítmény az egész alapsávon ( $0 \dots f_{\max}$ ) egyenletesen oszlik szét.



2.4. ábra  
Zajmintákhoz rendelhető időfüggvény és spektrum

Tehát a korrigált zajfeszültség:

$$U_{kv.z.k.eff} = \sqrt{\frac{Q^2 f_B R}{12 R f_{\max}}} = U_{kv.z.eff} \sqrt{\frac{f_B}{f_{\max}}} = U_{kv.z.eff} \sqrt{\frac{2 f_B}{f_{mv}}} \quad (2.27)$$

Figyelembe véve, hogy a teljes kvantálási tartomány helyett a jelfeszültség annak csak 219/255 része, a korrigált jelfeszültség:

$$U_{v.cs.cs.k.} = U_{v.cs.cs.} \frac{219}{255} \quad (2.28)$$

Végül a korrigált jel-zaj viszony:

$$\left. \frac{U_{v.k.}}{U_{kv.z.k.}} \right|_{dB} = 20 \lg \frac{U_{v.cs.cs.k.}}{U_{kv.z.k.eff}} = 20 \lg \frac{U_{v.cs.cs.}}{U_{kv.z.eff}} \sqrt{\frac{f_{mv}}{2 f_B}} \frac{219}{255} \quad (2.29)$$

(2.17) felhasználásával:

$$\left. \frac{U_{v.k.}}{U_{zaj kv.k.}} \right|_{dB} = 6,02b + 10,8 + 10 \lg \frac{f_{mv}}{2 f_B} - 20 \lg \frac{255}{219} \quad (2.30)$$

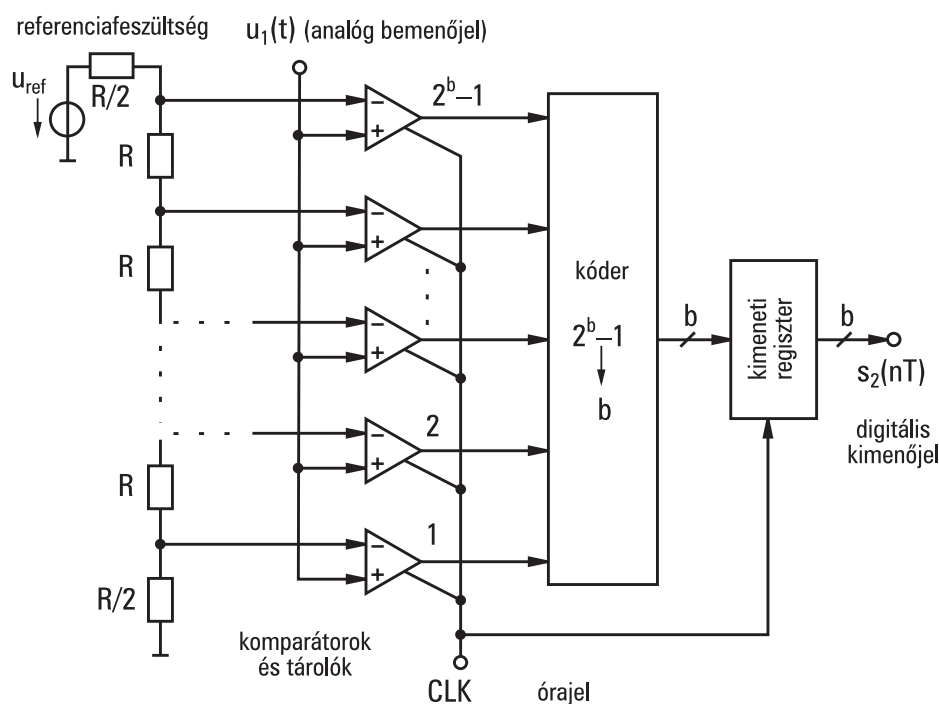
A világosságjelre  $f_{mv} = 13,5$  MHz,  $f_B = 5,75$  MHz,  $b = 8$ .

$$\left. \frac{U_{v.k.}}{U_{kv.z.k.}} \right|_{dB} = 6,02 \cdot 8 + 10,8 + 10 \lg \frac{13,5}{11,5} - 20 \lg \frac{255}{219} = 58,3 \text{ dB}$$

A krominanciajelekre  $f_{mv}=6,75$  MHz,  $f_B=2,75$  MHz,  $b=8$ , a kvantálási tartomány kihasználása 224/255, a jel-zaj viszony pedig 58,7 dB, közel azonos a luminanciajelre kapott értékkel.

### 2.3.1 A/D és D/A átalakítók videojelekhez

A videojelek digitalizálására napjainkban úgyszólván kizárólag csak az un. párhuzamos eljárást (Flash Conversion) alkalmazzák. Ilyen típusú átalakító tömbvázlata látható a 2.5. ábrán.



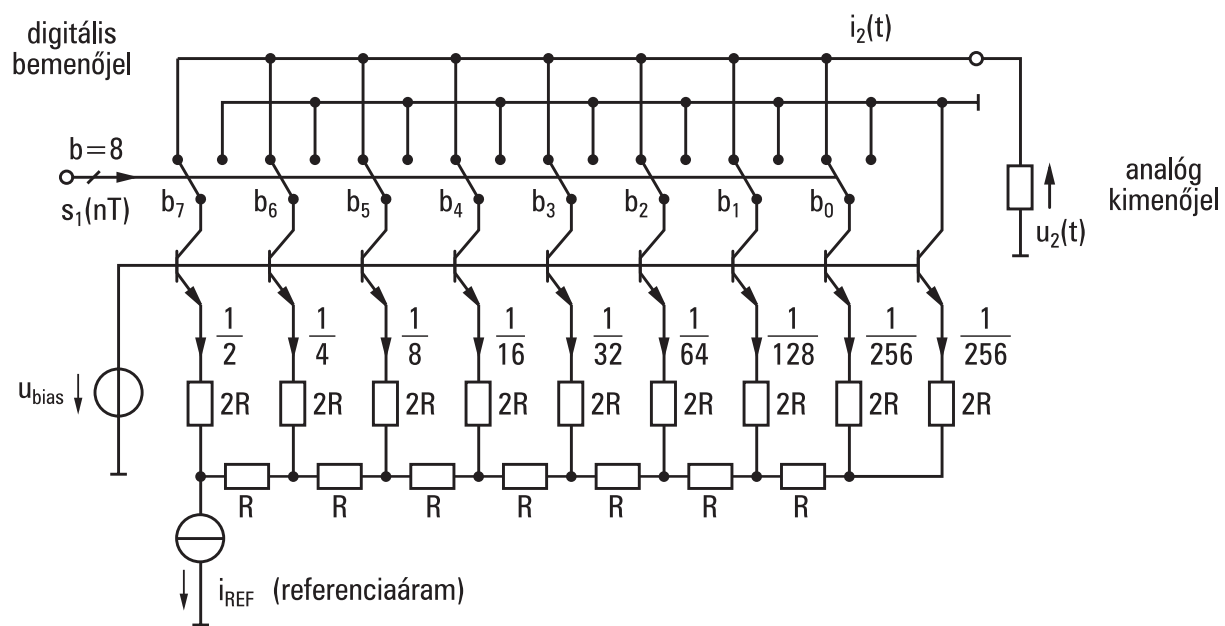
2.5. ábra

Párhuzamos analóg-digitális átalakító

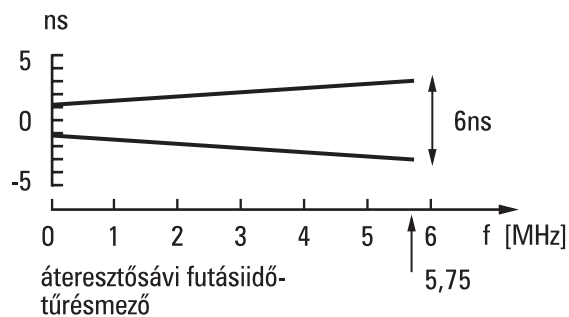
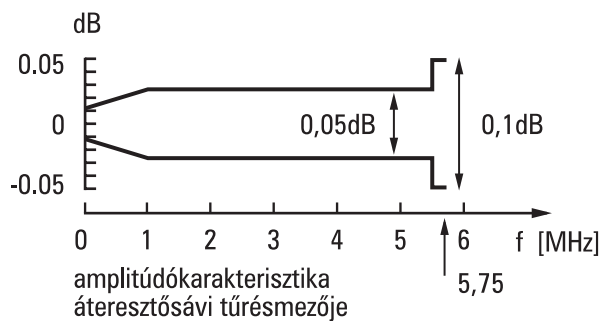
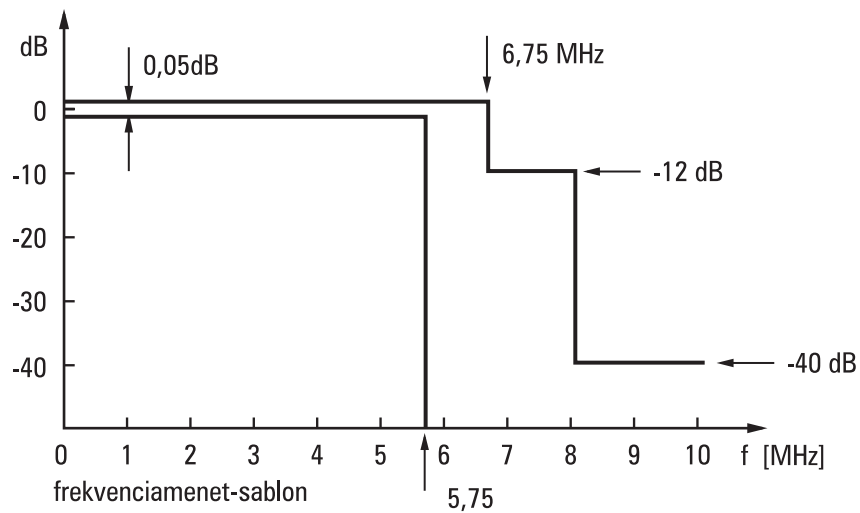
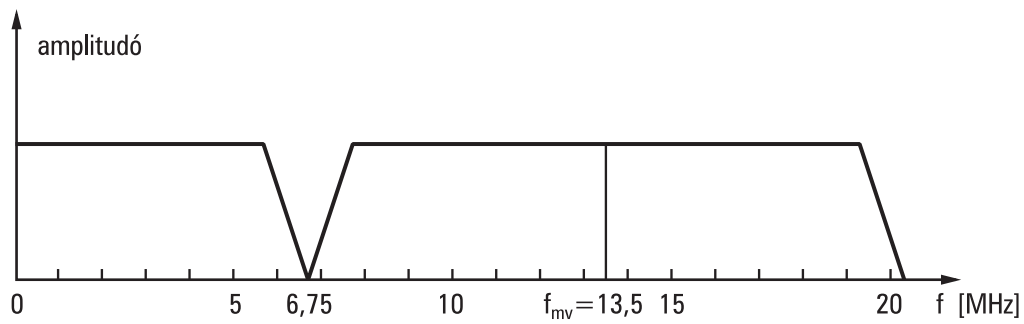
Az  $u_1(t)$  analóg bemenőjel a  $2^b - 1$  számú komparátorból álló komparátorláncra jut. A referenciafeszültséget a feszültségosztólánc  $2^b - 1$  részre osztja fel. Ezek a feszültségek jelennek meg a komparátorok másik bemenetén. A komparátorokat a mintavételi frekvenciával szinkron órajel aktiválja, amelyek így egyszerre mintavevők és kvantálók is. A komparátorok kimenőjelei hasonlóan adják meg a már kvantált feszültséget, mint a hőmérő emelkedő vagy süllyedő higanyszála a hőmérsékletet. A komparátorokhoz csatlakozó kódoló azután  $b$  bitből álló bináris kódokká alakítja a kvantált diszkrét feszültségértékeket. A kódérhez csatlakozó  $b$  kimenetű regiszteren jelenik meg a párhuzamos bitátvitelű digitális jel.

A digitális-analóg átalakítóknál a bemenőjel minden bitje egy áramforrást vezérel, amelynek árama a bit helyi értékének (súlyának) megfelelő mértékben járul hozzá a kimenet összáramához.



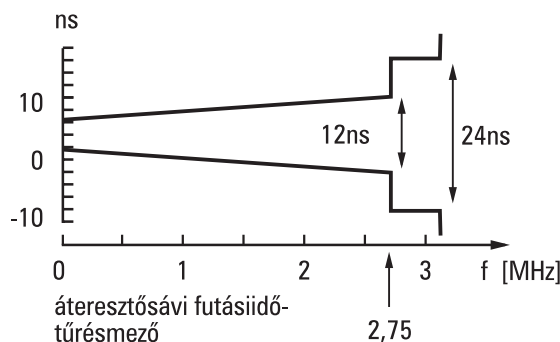
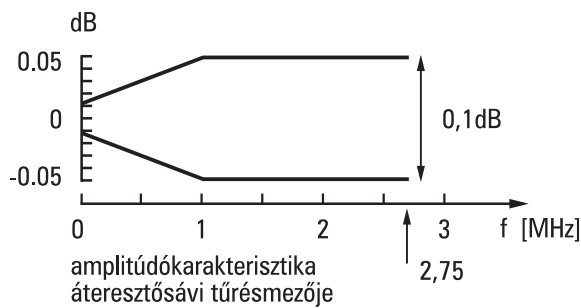
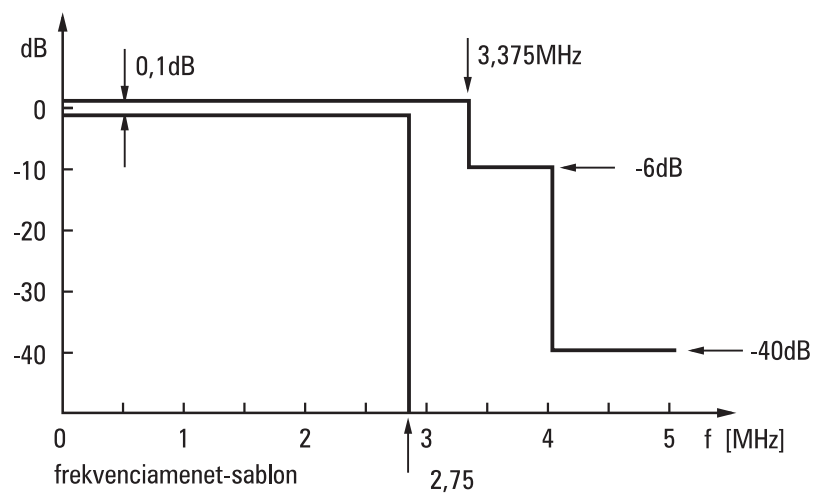
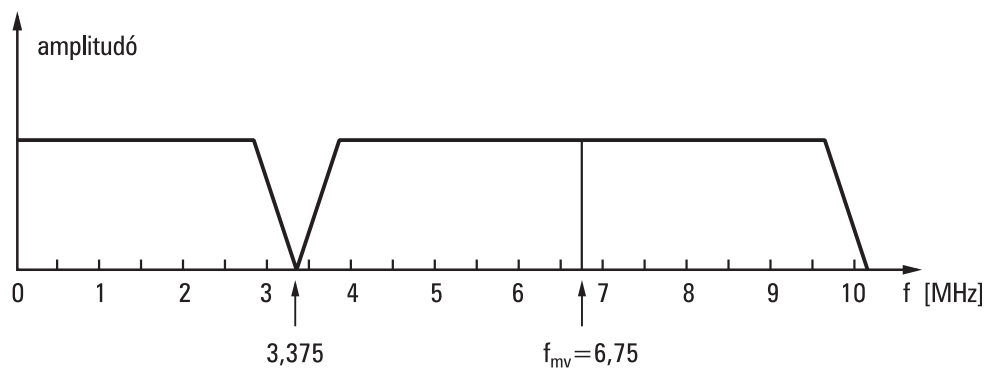


2.6. ábra  
D/A átalakító a videojel visszanyerésére



2.7. ábra

Mintavételezett világosságjel spektrumrészlete, az előszűrésénél és a rekonstruálásnál alkalmazandó aluláteresztő szűrő specifikációi



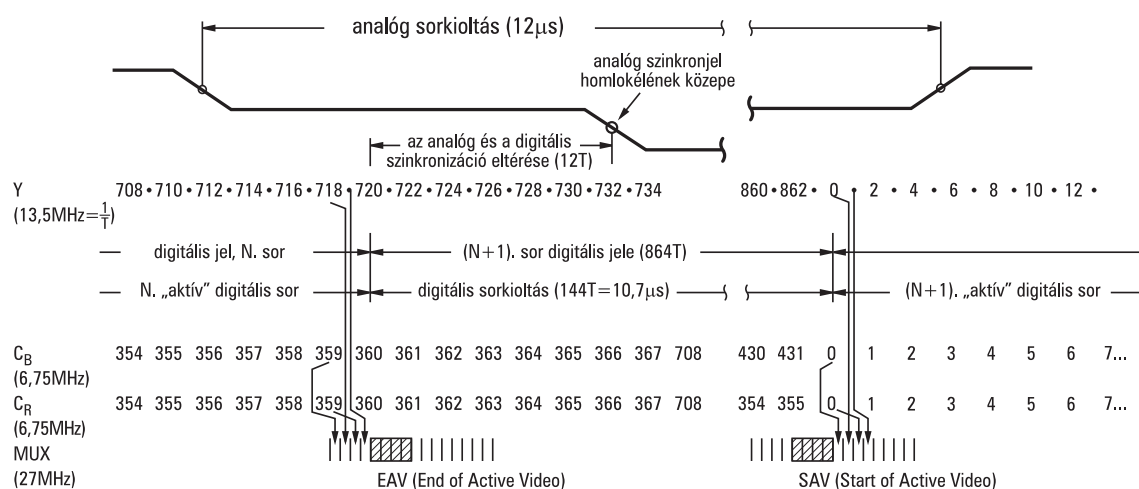
2.8. ábra

Mintavételezett szinkülönbségi jelek spektrumrésztele, a szinkülönbségi jelek előszűrésénél és rekonstruálásánál alkalmazandó aluláteresztő szűrő specifikációi

A 2.6. ábrán látható kapcsolási példában az  $s_1(nT)$  digitális bemenőjel bitjeinek megfelelő, 2 egész számú hatványai szerint növekvő részáramokat egy ellenálláshálózat segítségével hozzuk létre. Az áramok a  $b_7 \dots b_0$  kapcsolókkal a bejövő bitsorozatnak megfelelően vagy az  $i_2(t)$  analóg kimenetre, vagy a testre kapcsolódnak. A 2.7. ábra a világosságjel, a 2.8. ábra a színkülönbségi jelek előszűrésének, ill. rekonstruálásának szűrőspecifikációit adja meg.

### 2.3.2 A digitalizált videojelek időosztásos multiplexálása

A jelfeldolgozástól függően a világosság-, ill. színkülönbségi minták elkülönítve vagy időosztásos módon kezelhetők. Ez utóbbit tekintjük át a 2.9. ábra segítségével.



2.9. ábra  
625 soros szabvány jelkomponenseinek multiplexálása

A 2.9. ábráról leolvashatjuk továbbá az analóg és a digitális jel jellegzetes időpontjainak kapcsolatát is. A digitális jelben a sorkioltás az analóg szinkronjel homlokéle előtt 12 mintavételi periódussal kezdődik. Maga a sorkioltási idő (144 mintavételi periódus a 625 soros szabványban, és 138 az 525 sorosban) rövidebb az analóg jel sorkioltási idejénél. Mivel a mintavételi frekvencia és az „aktív” soridő mindkét rendszerben egyforma, így sikerült elérni, hogy a digitális és az analóg jelek időviszonyai csaknem rendszerfüggetlenek.

Az aktív sor elején és végén a digitális jel szinkronszavakat (Video Timing Reference Signals) tartalmaz. Elnevezésük „Start of Active Video” (SAV), ill. „End of Active Video” (EAV). Időtartamuk 4 időrés, amely alatt informálnak az aktuális félképről, a függőleges képkialakítás kezdetéről és befejezéséről. Ezenkívül még négy további bitet úgy kódolnak, hogy segítségükkel a vételi oldalon egy bithiba javítható, ill. kettő felismerhető legyen.

A párhuzamos bitátvitel nyolc, ill. tíz adatfolyamának multiplexsémája a 2.9. ábra utolsó sora szerinti. Egy kilencedik, ill. tizenegyedik vezetéken a 27 MHz-es multiplexórajelet továbbítják, hogy a vételi oldalon ne legyen szükség órajelregenerálásra.

Közvetlenül a sorkioltás (SAV) után indul a  $C_B$ ,  $Y$ ,  $C_R$ ,  $Y$ , ... jelkomponensek adatszavainak továbbítása. Ez a sorrend egészen a következő sorkioltás (EAV) kezdetéig tart, és így mindig két világosságértékhez a hozzátartozó két krominanciaérték rendelődik hozzá. A soros átvitelnél (Digital Serial Components, DSC) az adatfolyam párhuzamos-soros átalakítása után még kódolást is alkalmaznak, amely a jel spektrumformálása mellett

támogatja az órajelgenerálást, ill. a vételoldali szószinkronizálást. A soros jel adatsebessége 270 Mbit/s, és elsősorban a stúdiókon belüli jelszétosztásra, jeltovábbításra alkalmazzák [ITU 656].

## 2.4 Hangjelek digitalizálása

Használatos hangrendszerek mintavételi paramétereit, ill. adatsebességeit tartalmazza a 2.2. táblázat. Valamennyi felsorolt rendszer 16 bites kvantálást alkalmaz. A 32 és a 48 kHz-es mintavételi frekvenciák a távbeszélőrendszerek 8 kHz-es mintavételi frekvenciájának egész számú többszörösei. Hogy a videojelek rögzítésére készült képmagnókkal is lehessen digitális hangot rögzíteni a 44,1 kHz-es mintavételi frekvenciát is alkalmazzák, amely a 625 és az 525 soros tv-rendszerek sorfrekvenciáiból viszonylag egyszerűen származtatható. Pl. a 625 soros rendszerben a két frekvencia közötti kapcsolat:

$$44100 = \frac{2^2 \cdot 3^2 \cdot 7^2}{5^4} 15625.$$

2.2. táblázat

Analóg jelek digitalizálási paramétereit

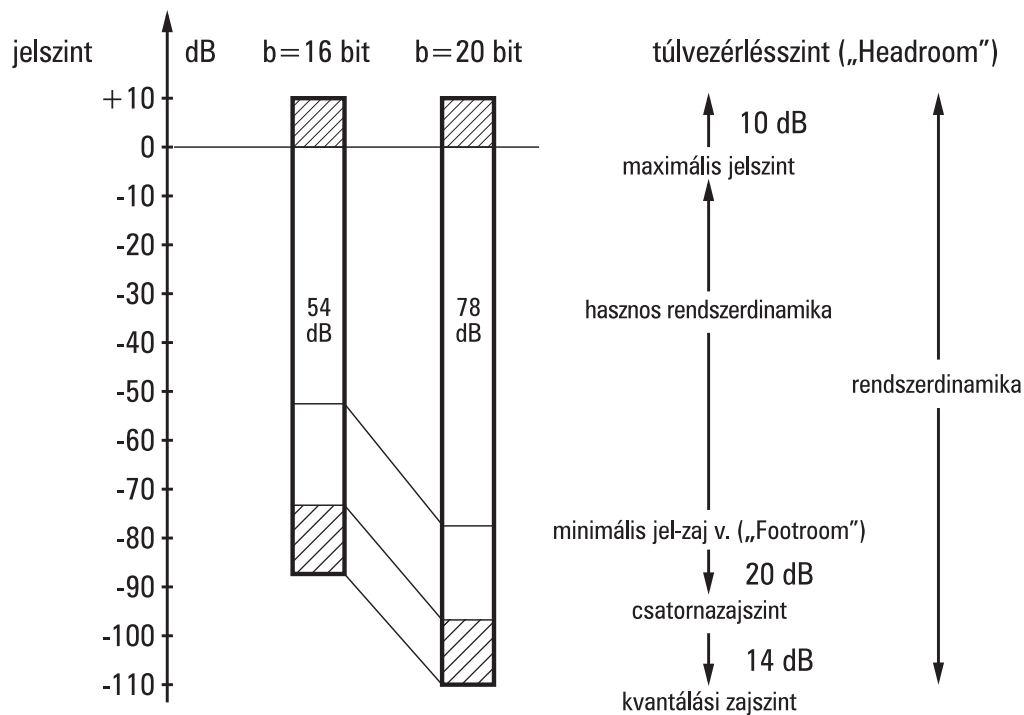
Rendszer	Mintavételi frekvencia [kHz]	V <sub>monó</sub> [kbit/s]	V <sub>sztereó</sub> [kbit/s]	Alkalmazás
DSR	32	512	1024	Digital Satellite Radio
CD	44,1	706	1412	hang-CD
AES/EBU	48	768	1536	hangstúdiótechnika

AES = Audio Engineering Society

EBU = European Broadcast Union

A kvantálási felbontás és a szintek kapcsolatát szemlélteti a 2.10. ábra.

Az un. rendszerdinamika a (2.18)-as összefüggéssel adható meg.



2.10. ábra  
Hangjelek analóg-digitális átalakításának szintdiagramjai

Az ábrán látható, hogy a 16 és a 20 bites felbontásnál is 10 dB-es tartomány biztosítja, hogy a maximális jelszintnél nagyobb túlvezérlés ne vezessen határoláshoz, ami hangátvitelnél mindenképpen elkerülendő. A kvantálási zajszintnél 14 dB-nel nagyobb a hangcsatorna ún. „üresjárási” zajszintje (pl. termikus zaj stb.) Az ún. minimális elfogadható jelszint az alacsony jelszintek tartományában meghatározott jel-zaj viszonyt („Footroom”) biztosító szintérték. Ezt a jel-zaj viszonyt 20 dB-ben rögzítve, a hasznos dinamikatartományra, azaz a maximális jelszint és a minimális elfogadható jelszint dB-ben kifejezett különbségére 54, ill. 78 dB-t kapunk. A teljes dinamikatartomány pedig a túlvezérlési szint és a minimális elfogadható jelszint dB-ben kifejezett különbsége, az előbbieknél 10 dB-nel nagyobb értékek. A szintdiagramok jól szemléltetik, hogy a stúdiótechnikában miért töreksenek a 20 bites felbontásra. Az átviteli csatornában nemlineáris kvantálással vagy a szinttartományoknak a jel kvázi pillanatértékéhez történő dinamikus illesztésével a tényleges bitszám 14-re, ill. 12-re csökkenthető anélkül, hogy az átvitel minőségében hallható romlás keletkezne.

### 2.4.1 Digitális hangjelek soros bitátvitel

A készülékeken belüli túlnyomórészt párhuzamos bitátvitel mellett a stúdiókban és a fogyasztói elektronika területén a soros bitátvitel terjedt el. Az alkalmazott jelformátumok egyike (AES/EBU) 32 bitből álló alkeretekbe tagolódik, amelyek egy hangminta maximálisan 24 bitje mellett szinkronjeleket, paritásbitet és egy ún. információs bitet tartalmaznak [IEC 958]. Két alkeret együtt alkot egy keretet két külön hang vagy egy sztereohang továbbítása céljából. A blokk 192 keretet tartalmaz, amelyben az ún. csatornastátusz az információs bitek összegeként kerül átvitelre. A csatornastátusz különféle üzeneteket tartalmaz a forrásról, a jelek paramétereiről, továbbá időkódot és

hibajavító biteket is. Ezeknek a soros bitátvitelű hangjeleknek a mintavételi frekvenciától függő adatsebességeit tartalmazza a 2.3. táblázat.

### 2.3. táblázat

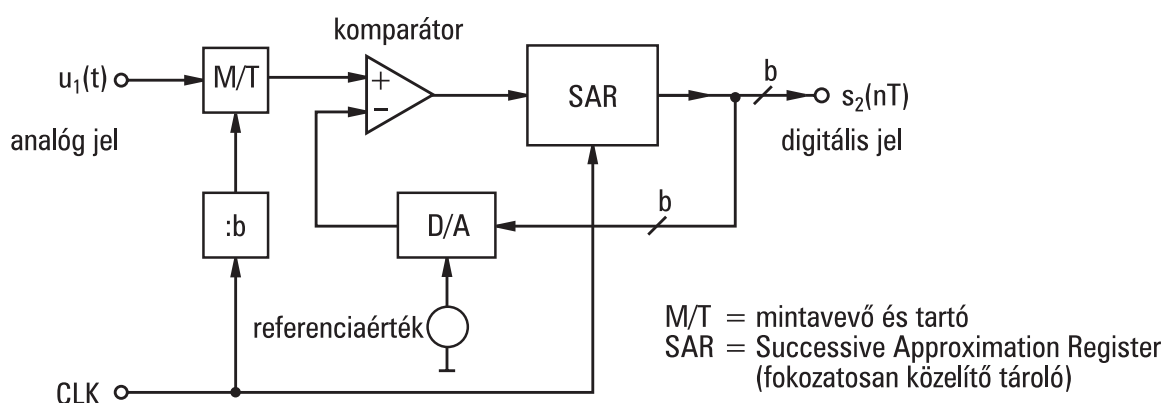
Soros bitátvitelű hangjelek adatsebességei

Mintavételi frekvencia [kHz]	$b_{\max}$ [bit]	$V_{\text{soros}}$ [Mbit/s]
32	24	2,048
44,1	24	2,8224
48	24	3,072

## 2.4.2 Hangjelek A/D és D/A átalakítói

Hangjelek digitalizálásánál nincsenek előírások az elő- és utószűrésre, mint a videojelekre pl. a 2.7. és 2.8. ábrákkal megadva. A szűrők csillapításának a zárótartományban legalább a kvantálási jel-zaj viszony értékét kell elérni. 48 kHz-es mintavételi frekvencia, 15 kHz-es előszűrő-határfrekvencia és 16 bites felbontás esetén 9-ed fokú Cauer-aluláteresztőre van szükség ahhoz, hogy ez a követelmény teljesüljön. Ez a nagyon kedvezően megválasztott eset is mutatja, hogy az előszűrés nem kis feladatot jelent, ami azonban a mintavételi frekvencia megnövelésével (un. túlmintavételezéssel) és digitális jelfeldolgozással lényegesen egyszerűsödik, ahogy azt majd látni fogjuk. Ugyanez érvényes az utó- vagy rekonstruáló szűrésre is.

Hangjelek digitalizálására elterjedten alkalmazzák a 2.11. ábrán látható, az un. fokozatos közelítés elvén működő analóg-digitális átalakítót.



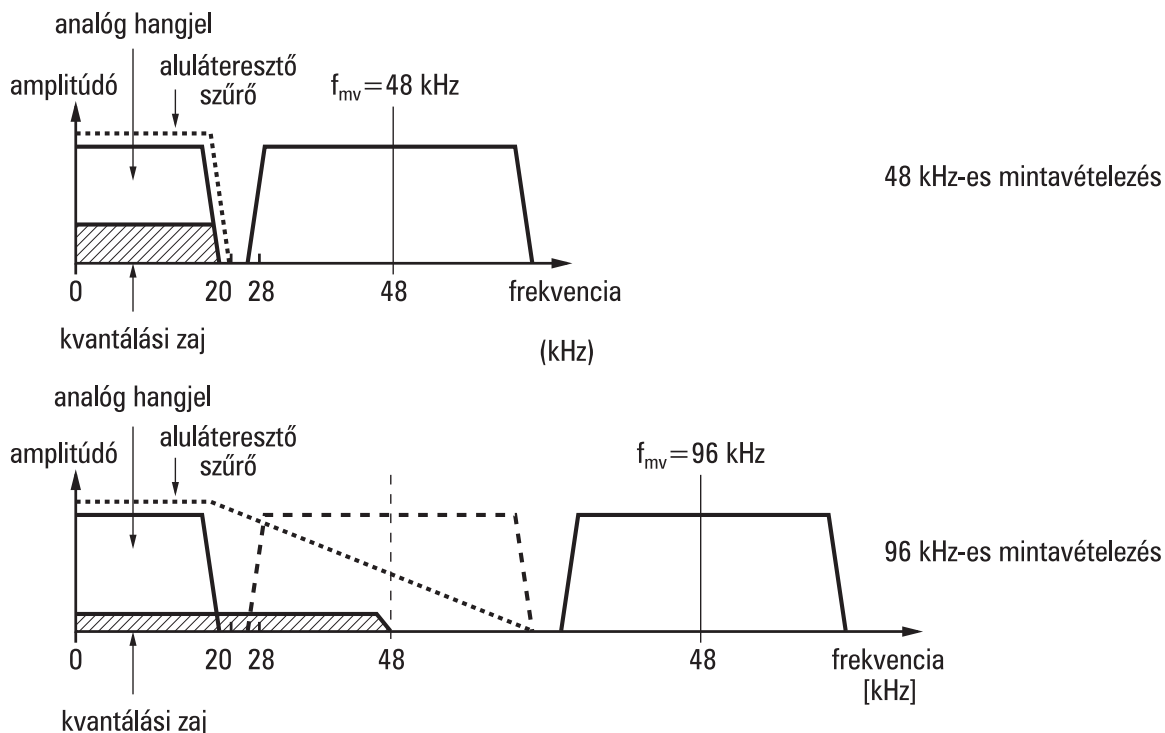
2.11. ábra

Fokozatos közelítéses A/D átalakító

A szukcesszív-approximációs (fokozatosan közelítő) regiszter segítségével a digitális kimenőjel valamennyi  $b$  bitjét egymás után, kezdve a legnagyobb helyiértékűvel, próba révén kapjuk meg. A próba eredményét a D/A átalakítás után a komparátor összehasonlítja a bejövő mintavételezett és a tartón tárolt jellel. A komparátor döntései (kisebb vagy nagyobb, ill. 0 vagy 1) adják meg a kimenőjel végső (digitális) értékét. A regiszter órajel-frekvenciájának legalább  $b$ -szer kell a mintavételi frekvenciánál nagyobb lennie.

A félvezető-technika fejlődése lehetővé teszi, hogy a mintavételi tétel által meghatározott minimális mintavételi frekvenciánál jóval nagyobb frekvenciaértékkel

történhessen az analóg-digitális átalakítás, ill. az analóg jel rekonstruálása. Ezt hívják túlmintavételezésnek (Oversampling, Überabtastung). Egyik előnye a spektrum alapsávi és amplitúdómodulációs (mintavételi) spektrumrészeinek egymástól való eltávolodása, ami lehetővé teszi az elő- és utószűrők oldalmeredekségével szembeni követelmények enyhítését, ahogyan az a 2.12. ábrán is látható.



2.12. ábra  
Kétszeresen túlmintavételezett jel spektrumának részlete

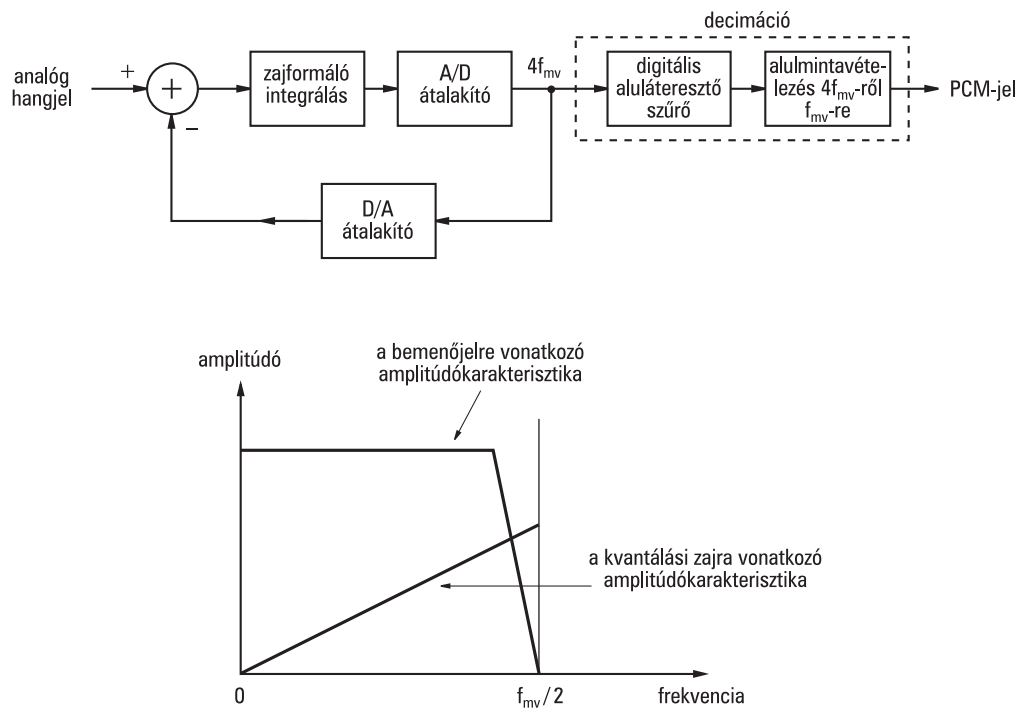
További előny a szükséges jelszűrésnek a digitális jelfeldolgozás területére történő részbeni áthelyezhetősége, ahol a magasabb rendű struktúrák is előnyösen, pl. fázistorzítások nélkül, kis ráfordítással valósíthatók meg. Végül a túlmintavételezés lehetővé teszi az átalakítás felbontásának és sebességének felcserélhetőségét, ami alatt azt kell érteni, hogy az egyiket növelve a másik csökkenthető. Ugyanis a túlmintavételezés hatására is csökken a kvantálási zaj teljesítménysűrűsége (2.12. ábra bevonalkázott spektrumrész), mert a  $Q^2/12$  kvantálási zajteljesítmény nagyobb frekvenciasávon oszlik szét, és emiatt csökken a hasznos sávba jutó rész. Tehát a jelhez adódó kvantálási zaj teljesítménye kétféle módon csökkenthető: a felbontás növelésével, ill. túlmintavételezéssel. A (2.18)-as összefüggésből kiindulva, a túlmintavételezést is figyelembe vevő jel-zaj viszony ezek után:

$$JZV(\text{dB}) = 6,02b + 1,76 + 10\lg d, \quad (2.31)$$

ahol  $b$  a kvantált minták értékét megadó bitek száma,  $d$  pedig az un. túlmintavételezési tényező. Négyeszeres túlmintavételezés hatására 6 dB-lel nő a jel-zaj viszony, ami felbontásban 1 bittel egyenértékű.

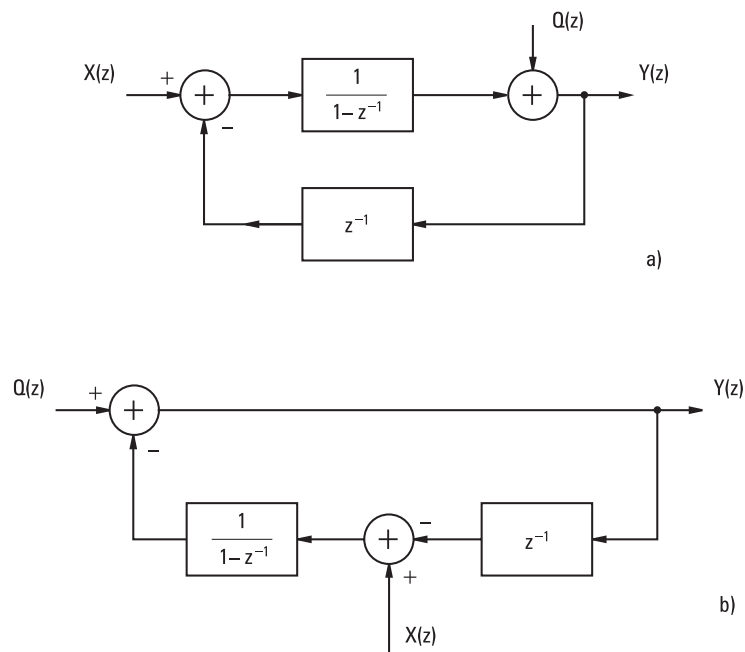
A zajscsökkentés további lehetőségét adják a zajspektrumformáló visszacsatolt analóg-digitális átalakítók. Ilyen áramkör látható a 2.13. ábrán, ahol a túlmintavételezés négyeszeres.





2.13. ábra  
A/D átalakító négyszeres túlmintavételezéssel és  
zajspektrumformáló visszacsatolással

A négyszeres mintavételi frekvenciájú adatsorozatot digitális aluláteresztő átlagolja, a kimenetre csak a mintavételi frekvenciának megfelelő gyakorisággal jut jel. Ezt a két műveletet hívják decimációnak. A szűrés így részben digitálisan valósul meg, ahogy arról már szó volt.



2.14. ábra  
Zajspektrumformáló visszacsatolás z-transzformációs helyettesítő képe

Hogy az áramkör vizsgálatára alkalmazhassuk a  $z$ -transzformációt, a különbségképzőre jutó analóg jeleknek tekintsük a mintavett értékeit. Így a 2.14. ábrán látható helyettesítőkapcsolásaihoz jutunk, ahol a D/A tömböt a  $z^{-1}$  átviteli függvényű tároló képviseli, ami azt jelenti, hogy a bejövő jelet az előző minta rekonstruált értékével hasonlítja össze a különbségképző. Az integrálási funkciót az  $1/(1-z^{-1})$  átviteli függvénnyel vesszük figyelembe, míg a digitális jelhez adódó kvantálási zajt az A/D átalakítóhoz csatlakozó összegező másik bemenetén lévő  $Q(z)$ -vel.

Így fel tudunk írni egy átviteli függvényt a jelre és egyet a zajra is. A zajra vonatkozó átviteli függvény felírását segíti a 2.14.b) ábra, ami csupán az a) ábra átrajzolása. Alkalmazzuk a negatív visszacsatolású hálózat átviteli függvényének általános kifejezését:

$$H(z) = \frac{H_F(z)}{1 + H_F(z)H_V(z)}, \quad (2.32)$$

ahol  $H_F(z)$  a különbségképző kimenete és az áramkör kimenete közötti tömbök eredő átviteli függvénye,  $H_V(z)$  pedig a visszacsatoló ágban lévőké. (2.32) alapján a jelre vonatkozó átviteli függvény:

$$H_j(z) = \frac{1}{1 + \frac{z^{-1}}{1 - z^{-1}}} = 1, \quad (2.33)$$

azaz a kvantálási hibától eltekintve, a kimenőjel értéke megegyezik a bemenőjellel. A kvantálási zajra felírható átviteli függvény a 2.14.b) ábra felhasználásával:

$$H_{kv.}(z) = \frac{1}{1 + \frac{z^{-1}}{1 - z^{-1}}} = 1 - z^{-1}. \quad (2.34)$$

$z$  helyére  $e^{j\omega T}$ -t írva megkapjuk a zajra vonatkozó átviteli karakterisztikát:

$$H_{kv.}(e^{j\omega T}) = 1 - e^{-j\omega T}. \quad (2.35)$$

Ennek abszolút értéke az amplitúdókarakterisztika:

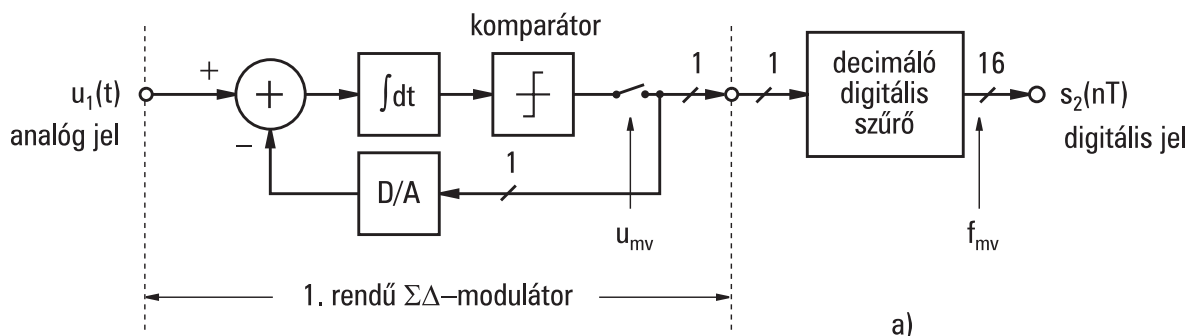
$$K_{kv.}(\omega T) = |H_{kv.}(e^{j\omega T})| = \sqrt{(1 - \cos \omega T)^2 + \sin^2 \omega T} = \sqrt{2 - 2 \cos \omega T} = 2 \left| \sin \frac{\omega T}{2} \right|. \quad (2.36)$$

Kis  $\omega T$ -kre

$$K_{kv.}(\omega T) \approx \omega T, \quad (2.37)$$

azaz a kvantálási zaj lineárisan nő a frekvenciával, ahogy az a 2.13. b) ábrán is látható. Az áramkör a zajra felüláteresztő szűrőként hat, jelentősen csökkentve ezáltal a kisfrekvenciás komponensek értékét.

Ha a 2.13. a) ábra A/D és D/A átalakítójának felbontását egy bitig csökkentjük, akkor hagyományos elnevezéssel az ún. szigma-delta modulátorhoz ( $\Sigma\Delta$ -modulátor) jutunk. Az elnevezésben  $\Sigma$  a visszacsatoló ág D/A átalakítójára,  $\Delta$  pedig a különbségképzőre utal. A gyakorlati megvalósítást a 2.15. ábra szemlélteti.

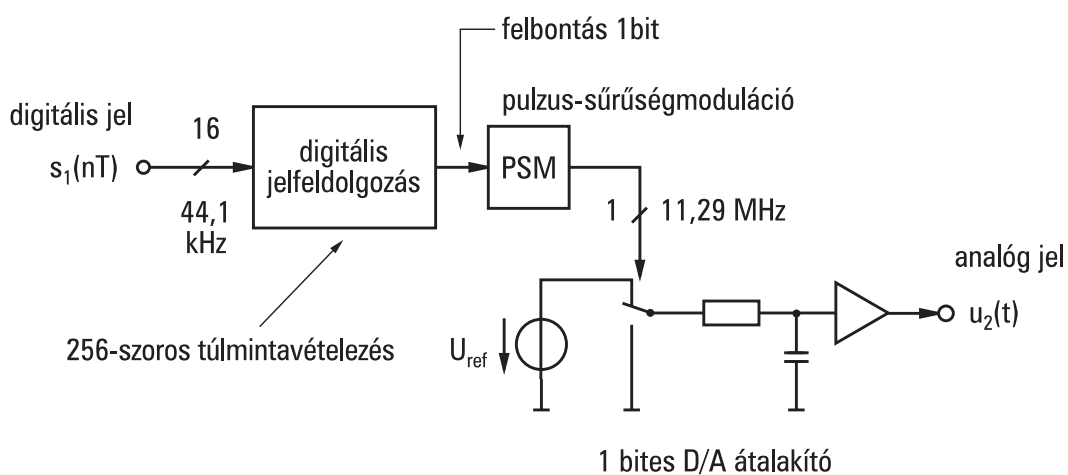


2.15. ábra  
 $\Sigma\Delta$ -modulátor tömbvázlata

A hangjelekre alkalmazott D/A átalakítók működési elve sokszor megegyezik a videojelre megismert áramkör (2.6. ábra) működési elvével. Mindenesetre a megkövetelt nagy felbontásnál a  $10^{-8}$  A nagyságú részáramok kézben tartása nem problémamentes. Ezért ennek az átalakítójának különféle változatai használatosak, amelyeknél belsőleg jelágakra bontják az áramkört, és átlagolják a jelfeldolgozás közben keletkező hibákat.

Érdekes alkalmazása ennek a típusú átalakítónak, amikor a vonatkozási áramot egy analóg jel helyettesíti. Ilyenkor az átalakító mint csillapító funkcionál, amelynek csillapítása a digitális bemenő jellel adható meg. A kapcsolás jól alkalmazható távszabályozott szintbeállításokhoz.

A túlmintavételezéses technika előnyösen alkalmazható hangjelek D/A átalakítóiban is. A 2.16. ábra az ilyen elven működő áramkör vázlatos felépítését szemlélteti.



2.16. ábra  
Egybites D/A átalakító túlmintavételezéssel