

3.18. DIGITÁLIS JELFELDOLGOZÁS

Az *analóg* jelfeldolgozás során egy fizikai mennyiséget (pl. a hangfeldolgozás kapcsán a levegő nyomásváltozásait) azzal analóg (hasonló, arányos) elektromos feszültséggé alakítjuk át, és a továbbiakban ezt a feszültséget dolgozzuk fel (erősítjük, visszük át a rádiócsatornán, stb.). Az analóg jel (az adott áramkörtől függő minimális és maximális érték között) bármilyen – tehát végtelen sok - értéket felvehet.

Az analóg jelhez az átviteli csatorna tulajdonságaitól függő *zaj* adódik (termikus zaj, sávzaj, stb.), amelynek az átvindó jellel azonos frekvenciatartományba eső komponensei szűrőkkel sem távolíthatók el, így a feldolgozott (továbbított) jel zajt is tartalmaz, eltorzul.

A *digitális* jelfeldolgozáskor első lépésként az analóg jelet digitális jellé alakítjuk át (analóg/digitális átalakítás vagy konverzió, ADC). A **bináris** digitális jel csak két feszültségszintet vehet fel (pl. ideális esetben a „0” értéknek 0V, az „1” értéknek 5V felel meg). A továbbiakban ezt a jelet visszük át, illetve dolgozzuk fel. A digitális jelet végül (digitál/analóg átalakítás vagy konverzió, DAC) újtján alakítjuk vissza analóg jellé.

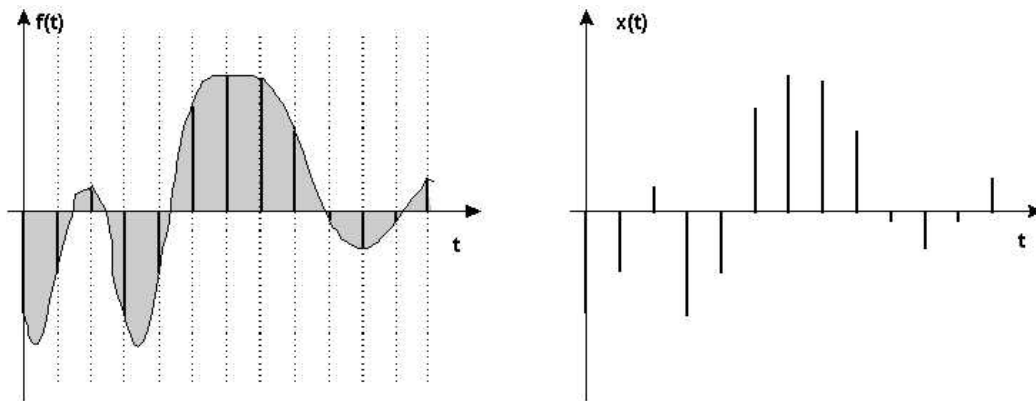
Az átvitel során a digitális jelhez is adódik zaj, azonban a vétel helyén a digitális jel értéke viszonylag nagy zaj esetén is hibátlanul megállapítható. Pl. a fenti feszültségszinteknél „0” értéknek tekinthetjük a digitális jelet, ha a feszültség értéke kisebb, mint 2,5V, és „1” értékűnek, ha a feszültség 2,5V-nál nagyobb. Könnyű belátni, hogy ha igen nagy szintű, 2V amplitudójú zavarjel adódik is az átvitt digitális jelünkhöz, a vételi helyen a „0” jelszintnél akkor is $-2...+2V$ közé esik a feszültség értéke (amelyet, mivel 2,5V-nál kevesebb, „0” jelszintként azonosítunk). „1” szint átvitelénél pedig $+3...+7V$ közé esik a vett feszültség (amelyet, lévén nagyobb $+2,5V$ -nál) „1” jelszintként veszünk, tehát a vett digitális jelet – az átviteli csatorna zajától függetlenül – hibamentesen azonosítjuk.

A digitális jel – amely az ADC után az analóg jel pillanatértékeinek egy-egy számot feleltet meg – számítástechnikai eszközökkel feldolgozható, és így az analóg technikával megvalósíthatatlan feladatok oldhatók meg.

3.18.1. Analóg/digitál átalakítás (ADC). Mintavételezés, kvantálás, kódolás

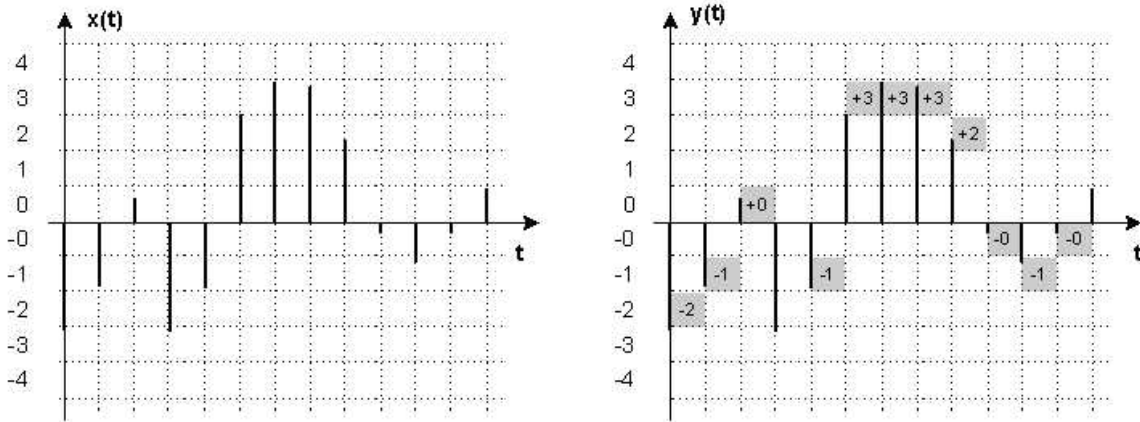
Az analóg jelet a következő módon alakítjuk át digitális jellé:

Rövid időközönként meghatározzuk az analóg jel pillanatértékeit. A legnagyobb pontosságot az jelentené, ha ezt végtelen rövid időnként, és végtelen pontossággal végeznénk el, ami gyakorlatilag megoldhatatlan. Ténylegesen rövid, $T_{\text{minta}} = 1/f_{\text{minta}}$ időközönként határozzuk meg az analóg jel értékét. Ezt az eljárást **mintavételezésnek** nevezik. A mintavételező áramkör az analóg $f(t)$ jelet $x(t)$ impulzussorozattá alakítja át (1. ábra).



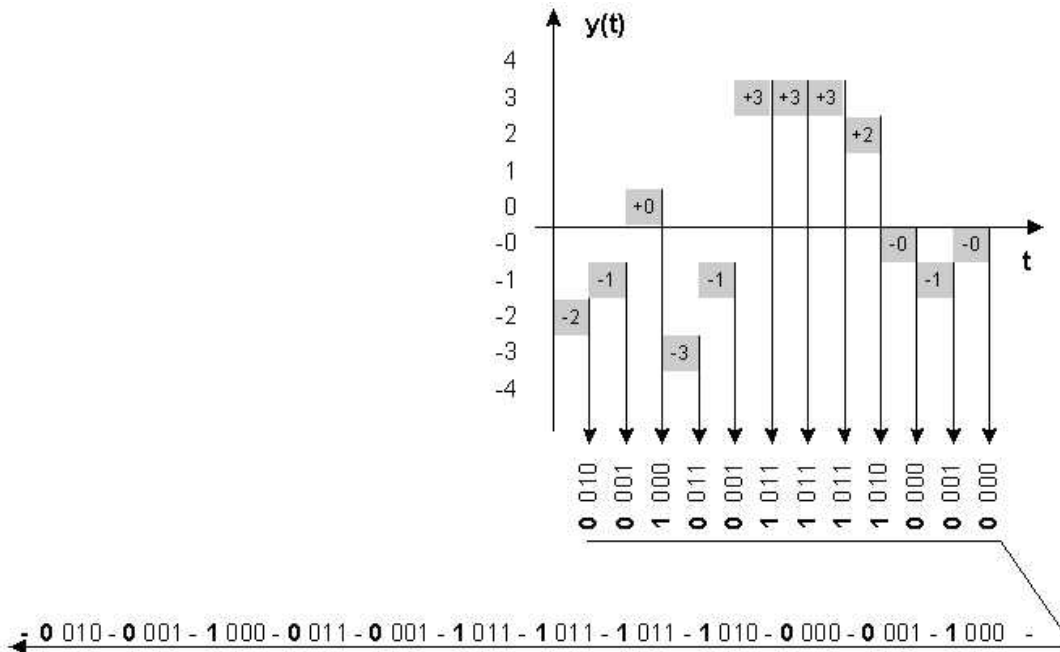
1. ábra

Az analóg jel végtelen sok értéket vehet fel, egy ilyen értéket csak nagyon sok számjeggyel lehetne nagy pontossággal kifejezni. Ezért egy-egy mintának nem a pontos értékét adjuk meg digitálisan, hanem az analóg jeltartományt előre megállapított számú részre osztjuk, és azt adjuk meg, hogy a vett minta melyik két, előre megállapított érték közé esik (ez a **kvantálás**). A mintavételezett jel a kvantáló áramkörre jut, amely megállapítja, hogy az egyes minták amplitúdója melyik jeltartományba esik, és előállítja $y(t)$ kvantált jelet (a 2. ábrán az amplitúdótartományt összesen 10 részre, kvantumra osztottuk).



2. ábra

A jel valamely mintavételi időpontban felvett, kvantált értékét egy binárisan kódolt számmal fejezzük ki (**kódolás**). A kvantált jel a kódoló áramkör bemenetére kerül, amely minden $y(t)$ értékhez egy bináris kódszót rendel, amely már a továbbiakban digitálisan feldolgozható (3. ábra). Az ábra kódolási eljárása szerint a pozitív előjelet 1, a negatív előjelet 0 számjegy jelzi, ez a kódszó első bitje. A következő három bitje a minta értékét kettes számrendszerben fejezi ki, a számjegyek helyi értéke sorban 4, 2 és 1. Az egyes mintákhoz tartozó kódszavakat a kódoló egység a mintavétel sorrendjében szolgáltatja.



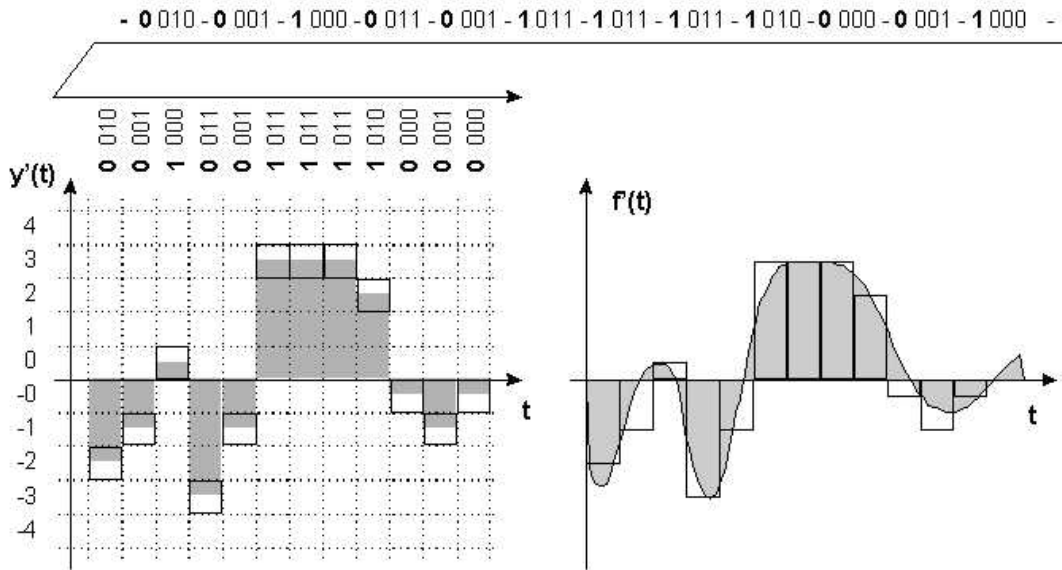
3. ábra

Ezzel az analóg/digitál átalakítást elvégeztük: az analóg jelet a mintavételi időpontokban a jel pillanatértékét jellemző bináris digitális jellé alakítottuk.

A digitális jel az átviteli csatornán áthaladva torzulásokat szenvedhet (zajjal terhelődhet), azonban a vétel helyén a jel jó közelítéssel helyreállítható.

3.18.2. Digitál/analóg átalakítás (DAC), dekódolás.

Az analóg jel visszanyeréséhez (digitál/analóg átalakítás, DAC) a vett, helyreállított digitális jelet vissza kell alakítani, **dekódolni** kell. A dekódoló a beérkező kódszavakból előállítja az $y'(t)$ függvényt, amelyből aluláteresztő szűrővel (**visszaállító szűrő**) visszaállítható az eredeti $f(t)$ -t jól közelítő $f'(t)$ analóg jel (4. ábra).



4. ábra

3.18.3. Legkisebb mintavételi frekvencia, aliasing

A mintavételezés folyamatának alapja a Nyquist-Shannon mintavételezési tétel, amely szerint a $0 \dots f_0$ frekvenciatartományba eső időfüggvény véges számú minta segítségével, információvesztés nélkül átvihető, ha az f_{minta} mintavételezési frekvencia f_0 frekvenciának legalább kétszerese:

$$f_{\text{minta}} \geq 2 f_0$$

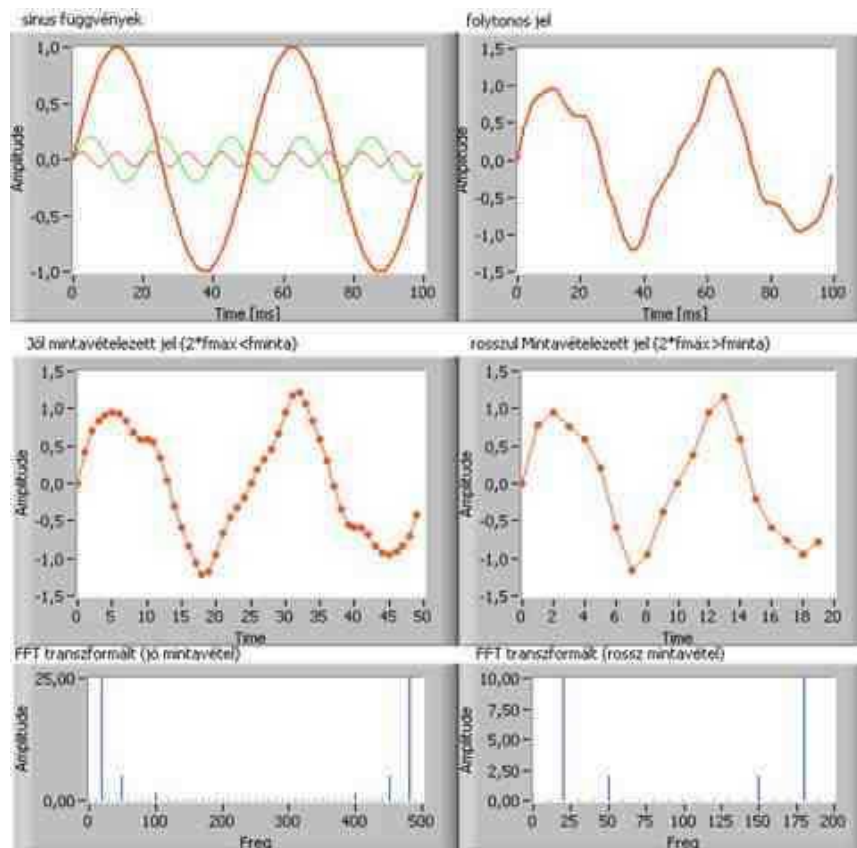
Adott mintavételezési frekvenciánál a mintavételezendő jelből aluláteresztő szűrővel (**AAF, antialiasing szűrő**) kiszűrhetők az $f_{\text{minta}}/2$ -nél magasabb frekvenciájú komponensek, és akkor fenti feltétel teljesül. Ilyen szűrés hiányában azonban a mintavételezendő jelben maradhatnak $f_{\text{minta}}/2$ -nél magasabb frekvenciájú komponensek, ekkor a mintavételezés során ezek a komponensek is bekerülnek a mintavételezett jelbe, és véletkor az aluláteresztő szűrővel helyreállított jelben hamis **aliasing** frekvenciák léphetnek fel, amelyek erős torzulásokat okozhatnak.

Az 5. ábra bal felső részén láthatjuk azokat a harmonikusokat, melyek összegzéseként az ábra jobb felső részén látható jelalak kialakul.

A bal középső ábra helyesen mintavételezett jelet mutat (a mintavételezési frekvencia nagyobb, mint a mintavételezett jel legnagyobb frekvenciájú komponensének kétszerese), így a kialakuló minták követik a mintavételezett jel alakját, azokból az aluláteresztő szűrővel visszaállítható lesz.

A jobb középső ábrán a mintavételi frekvencia túl alacsony, ezért a mintákból aluláteresztő szűrőn átbocsátva torz jelalak alakul ki.

A két alsó ábra a helyesen, illetve helytelenül mintavételezett jel frekvenciaspektrumát mutatja; látható, hogy a két jel nem azonos frekvenciájú komponenseket tartalmaz.



5. ábra

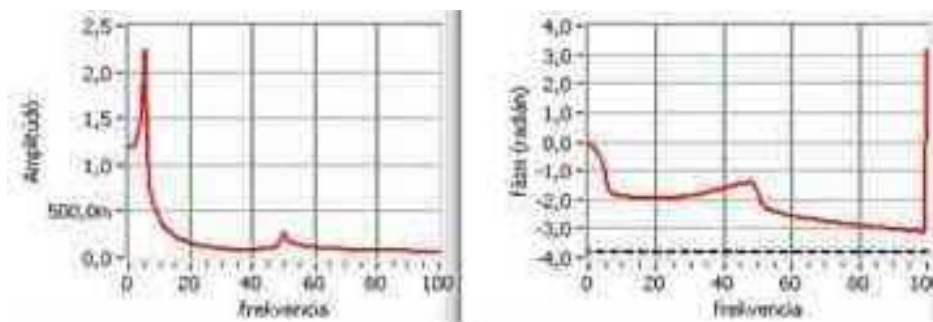
3.18.4. Fourier transzformáció

Fourier francia matematikus mutatta ki, hogy minden folytonos, periodikus jel előállítható különböző frekvenciájú és fázisú szinuszos jelek összegeként (ezek a jelek alkotják a vizsgált jel *frekvenciaspektrumát*).

A **Fourier-transzformáció** segítségével egy jel időbeli lefolyásából megállapítható annak frekvenciaspektruma.

A Nyquist-Shannon mintavételezési tételből következik, hogy a jel frekvenciaspektruma a belőle vett mintákból akkor állapítható meg egyértelműen, ha a mintavételezési frekvencia a jel legnagyobb frekvenciájú komponensének legalább kétszerese. Kimutatható, hogy a vizsgált jel n mintájából meghatározható spektrumának n komponense. Ez az eljárás a **Diszkrét Fourier Transzformáció (DFT)**.

A 6. ábra egy jel DFT-vel kapott spektrumát mutatja, a bal oldali ábra a komponensek amplitúdóját, a jobb oldali pedig a fázisát mutatja a frekvencia függvényében.



6. ábra

A DFT igen időigényes, pl. egy 1024×768 -as felbontású állókép esetében $618,47 \times 10^9$ műveletre van szükség. Hosszabb zenei felvétel, vagy több állókép feldolgozása a PC-k mai sebességét figyelembe véve a számítások időigénye miatt gyakorlatilag megvalósíthatatlan.

A megoldást a gyors Fourier-transzformáció (**FFT = Fast Fourier Transform**) jelenti. Ez az eljárás (a DFT-hez hasonlóan) N db. időtartományi mintából N db. frekvenciatartományi mintát állít elő, de lényegesen (pl. a fenti állókép esetén több, mint 40000-szer) rövidebb idő alatt. Az FFT alapelve az, hogy a már kiszámított transzformáltakból egy algoritmus segítségével határozza meg a továbbiakat.

3.18.5. Digitális szűrők

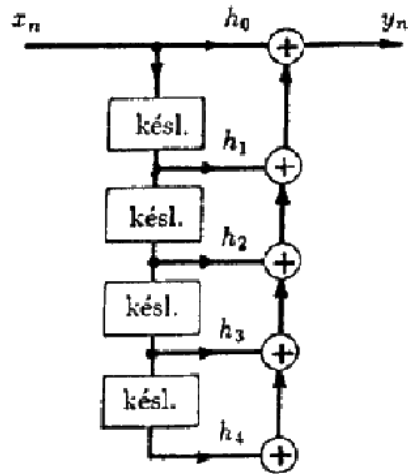
A digitális szűrők mind a jelek frekvenciatartományi szétválasztására, mind a zajok eltávolítására eredményesen használhatók.

A digitális szűrő olyan berendezés (eljárás), amely x_n elemekből álló (bináris) számsorozatot y_n elemekből álló (bináris) számsorozattá alakít át.

Konvolúciós szűrők (FIR = Finite Impulse Response, a szűrő impulzus-válasza véges idejű)

A **konvolúció** a digitális jelfeldolgozás módszere, amelynek segítségével a bemenő jelből a rendszer ún. súlyfüggvénye ismeretében meghatározható a rendszer kimenő jele.

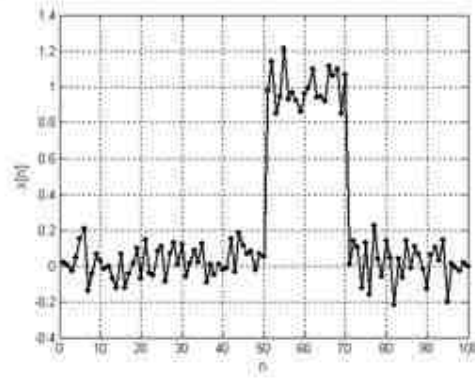
A 7. ábrán látható digitális szűrő késleltető elemekből áll, melyek kimeneteit különböző súlyozással összegezzük (most ez a súlyozott összegzés a konvolúció.). A késleltetők mindegyike egy-egy szám tárolására képes, amelyek minden lépésben egy késleltetővel tovább lépnek.



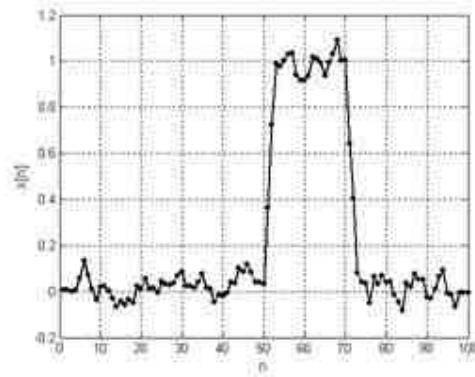
7. ábra

Ha a szűrő bemenetére (egy impulzusnak megfelelő) egyetlen 0-tól különböző bináris szám érkezik, a kimeneten annyi (nyilvánvalóan véges) ideig kapjuk a megfelelően súlyozott bináris számokat, ameddig az összes késleltető ki nem ürül.

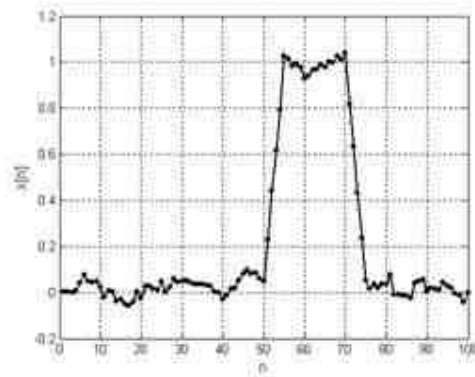
A konvolúciós szűrő alkalmazható az *időtartományban*, jellegzetesen a jelre ülő zaj kiszűrésére. Elve az, hogy (mivel a jelre ülő zaj átlagértéke általában 0), a jel egy szakaszának értékeit átlagolva a zaj eltűnik, és csak a jel marad meg. A 8.a ábrán egy zajos jelet láthatunk, a szűrt jelet pedig 3 késleltetővel a 8.b, 5 késleltetővel a 8.c, ill. 12 késleltetővel a 8.d. ábra mutatja.



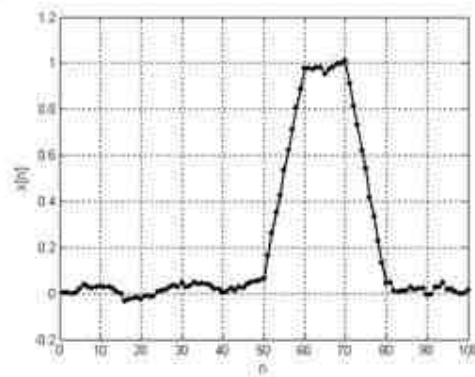
8.a ábra



8.b. ábra



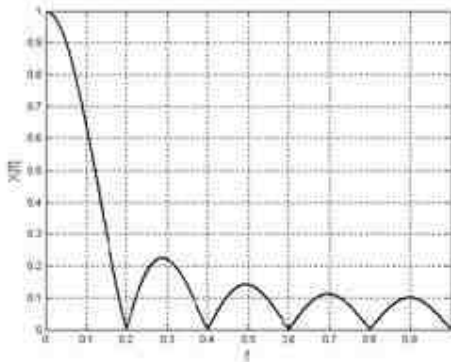
8.c. ábra



8.d. ábra

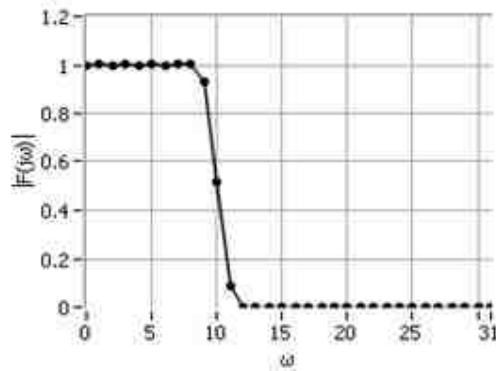
A 8. ábrán az is látható, hogy a késleltetők számának növelésekor (az átlagolás eredményeként) nem csak a zaj, hanem – nem kívánatos hatásként – az impulzus oldalmeredeksége is erősen csökken. Zajsűrűségi elnyomáshoz dönteni kell, hogy a zaj elnyomása, vagy az impulzus gyors fel/lefutása a fontosabb, és a késleltetők számát ennek megfelelően kell megválasztani.

Az átlagoló jellegű szűrés tulajdonképpen a gyors változásokat, azaz a magasabb frekvenciás komponenseket szűri ki a jelből, azaz a konvolúciós szűrő a *frekvenciatartományban*, mint aluláteresztő szűrő is alkalmazható. A késleltetők számának növelésével az áteresztő tartomány frekvenciahatára lejjebb tolik. Egy átlagoló konvolúciós szűrő frekvenciatartományi átvitelét a 9. ábrán láthatjuk.

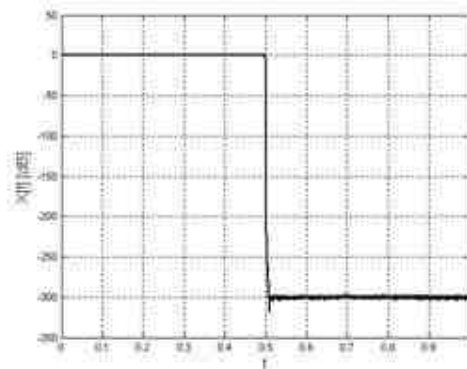


9.a ábra

A késleltetők számának és súlyozásának (az átlagoló szűrőhöz képesti) változtatásával a szűrő frekvenciamenete javul (9.b. ábra), több szűrő egymás után kapcsolásával pedig jól közelíti az ideálist (9.c. ábra).



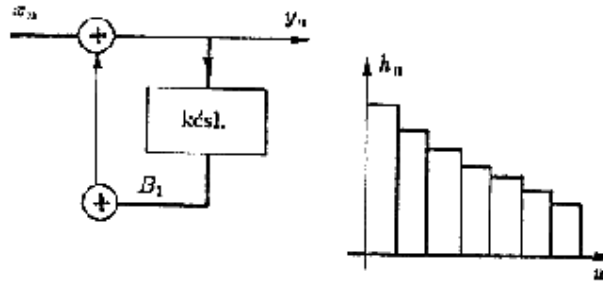
9.b. ábra



9.c. ábra

Végtelen válaszidejű szűrők (Rekurzív vagy IIR = Infinite Impulse Response)

A 10. ábra szerinti elrendezésű digitális szűrő az éppen képzett y_n számnak adott súlyozású hányadát adja hozzá a következőként beérkező x_{n+1} számhoz, így adódik y_{n+1} értéke.



10. ábra

Ha a bemenetre egyetlen „1”, majd „0” számok érkeznek, és $B_1=0,9$, akkor a kimeneten 1; 0,9; 0,81 stb. jelenik meg. A szűrő elvileg végtelen lépésben keresztül produkál kimenő jelet (gyakorlatilag addig, ameddig a számítógép által kezelhető legkisebb számot el nem éri).

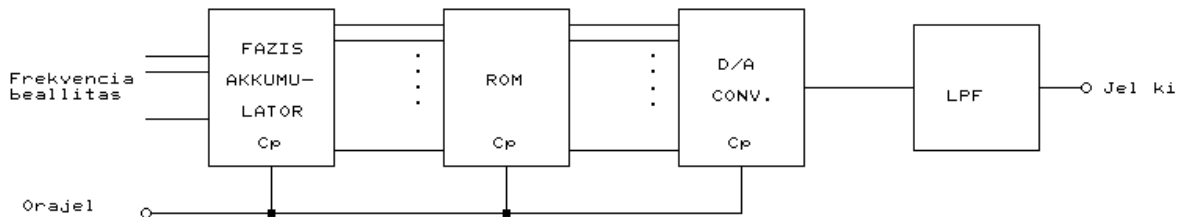
Az IIR szűrők gyorsak, de teljesítményük nem éri el a FIR szűrőkéét.

Különféle karakterisztikájú (nem csak aluláteresztő szűrő valósítható meg!) szűrők kialakításához FIR és IIR szűrők egymás után kapcsolhatók.

3.18.6. Közvetlen digitális szintézis (DDS)

A nagy sebességű digitális áramkörök (pl. D/A átalakítók) megjelenése lehetővé tette nagyfrekvenciás szinuszjelek közvetlen digitális előállítását.

A DDS (Direct Digital Synthesis) oszcillátor tömbvázlata a 11. ábrán látható.



11. ábra

A „Fázis akkumulátor” egy digitális számláló, amely minden órajelnél előre számlál. Azt, hogy a számláló órajelenként mennyivel növelje a tartalmát, a „Frekvencia beállítás” bemenetre érkező utasítás határozza meg. A számláló tartalma jelzi a generálandó szinuszjel fázishelyzetét 0...360 fok tartományban. Egy teljes periódus (360 fok) generálása után a számláló alaphelyzetébe kerül, és újra kezdi a számlálást.

A számláló kimenő bitjei a ROM cím bemeneteivel vannak összekötve. A ROM tárolja bináris formában a szinuszjel különböző fázishelyzetéhez tartozó aktuális pillanatértékeit.

A ROM adat kimenete a D/A digitál-analóg átalakító bemenetére csatlakozik, amely a szinuszjel digitálisan tárolt pillanatértékének megfelelő analóg feszültséget szolgáltatja a kimenetén.

A DDS oszcillátor kimenő jelét LPF aluláteresztő szűrő kimenetén kapjuk meg.

Az előállítható legnagyobb frekvencia szempontjából alapvető szerepe van az órajelnek, hiszen Nyquist-Shannon tétele szerint a mintavételezési frekvencia (ami ez esetben az órajel) legalább kétszerese

kell, hogy legyen a mintavételezett jel frekvenciájának. Így az elvileg előállítható legnagyobb jelfrekvencia az órajel frekvenciájának a fele.

A fázisakkumulátor nagyon nagy számú fázishelyzetet tud megkülönböztetni, mivel a különböző frekvenciák előállításánál más-más lépéssel előre számolva a szinuszjel különböző fázishelyzeteit kell kijelölnie. Pl. 24 bites számláló esetén 16 millió fázishelyzetet különböztethet meg. A ROM ugyanennyi fázishelyzethez tartozó szinuszjel pillanatértéket tárol.

Ha a fázisakkumulátor számlálási lépését (azaz, hogy egy órajelre mennyivel növelje a tartalmát) nagyobbra állítják, a szinuszjel fázisa gyorsabban változik, azaz az oszcillátor kimenetén magasabb frekvenciájú jel jelenik meg. A számlálási lépés csökkentésével a fázisváltozás sebessége, így a kimenő jel frekvenciája is csökken.

Azt, hogy az oszcillátor frekvenciája milyen lépésekben változtatható, a fázisakkumulátorban megkülönböztethető fázishelyzetek száma határozza meg. Az említett 24 bites fázisakkumulátor 5 MHz-es órajel esetében 0,25 Hz-es frekvencialépést tesz lehetővé.

A DDS oszcillátor által előállított jel frekvenciája pl. PLL felhasználásával növelhető.

A DDS oszcillátorok előnye egyszerűségük (az egész oszcillátor egy integrált áramkörtokban elfér), de hátrányaik is vannak. Ilyen hátrány, hogy a kimeneten hamis (alias) frekvenciakomponensek is megjelennek (pl. 10 MHz-es órajel, és 3 MHz-es előállított jel esetén a kimenő jelnek van 7 és 13, sőt 17 és 23 MHz-es frekvenciakomponense is). A nagyobb frekvenciás összetevők az oszcillátor kimenetén elhelyezett aluláteresztő szűrővel kiszűrhetők. Megjelenhetnek azonban az előállított jel frekvenciájához közeli komponensek is. Ezek általában alacsony szintűek, de némely alkalmazásban problémákat okozhatnak.