

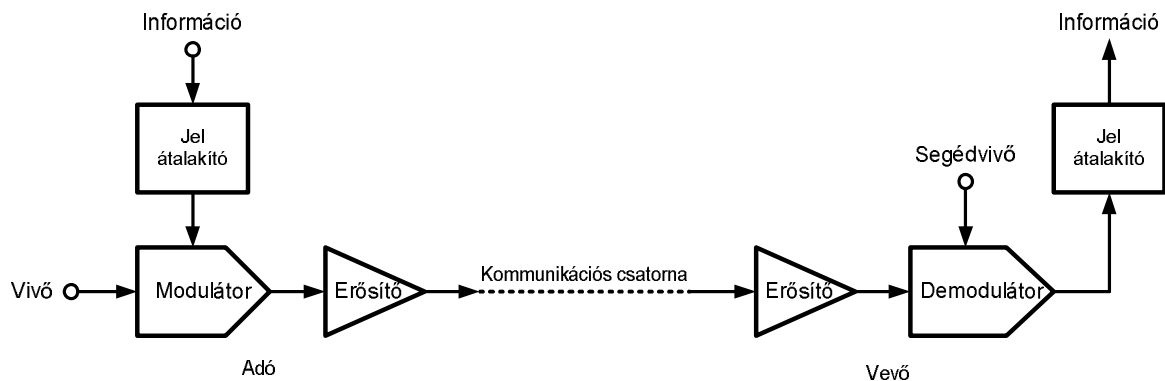
9. Modulátorok

A modulátorok olyan elektronikus áramkörök, amelyek egy vivő jel paramétereit módosítják (modulálják), egy információt tartalmazó jel függvényében. A moduláló jel tartalmazza az információt, a vivő jel pedig az információ hordozó (továbbító). A demodulátor az az áramkör, ami a moduláló jel visszaállításához szükséges inverz műveletet hajtja végre. A mindkét művelet végrehajtására képes eszköz (a két kifejezés összevonásából), a modem.

A moduláció fő előnyei:

- a jelátvitel magasabb frekvenciasávba transzponálva valósul meg
- több jel egyidejű átvitele az átviteli csatornán (frekvencia- vagy időmultiplexelés)
- a jel/zaj viszony növelése

Minden kommunikációs rendszer alapvetően nagyon hasonló, csupán a részletekben különböznek egymástól, attól függően, hogy milyen modulációs rendszert használnak (9.1 ábra).



9.1 ábra Kommunikációs rendszer tömbvázlata

Az átalakító kimenetéről az elektromos jel a modulátorba kerül, ahol azt egy oszcillátorral előállított vivőfrekvenciára ültetjük. A vevő oldalon a demodulátor pedig leválasztja az információt a modulált jelről.

A vivőhullám illetve a moduláló jel természete meghatározza az alkalmazott modulációs eljárások típusát. Ezek szerint a modulációs műveleteket 4 osztályba sorolhatjuk:

- Folytonos (szinuszos) vivőhullám, folytonos moduláló jel:
 - Amplitúdómoduláció AM
 - Frekvenciamoduláció FM
 - Fázismoduláció PM
- Folytonos (szinuszos) vivőhullám, digitális moduláló jel:
 - Amplitúdóbillentyűzés ASK
 - Frekvenciabillentyűzés FSK
 - Fázisbillentyűzés PSK
- Impulzus vivőhullám, folytonos moduláló jel:
 - Impulzusamplitúdómoduláció PAM
 - Impulzushelyzetmoduláció PPM
 - Impulzusszélességmoduláció PWM
 - Impulzusfrekvenciamoduláció PFM
- Impulzus vivőhullám, digitális moduláló jel:

- Impulzuskód-moduláció PCM
- Delta-moduláció DM
- Deltakód-moduláció DPCM

9.1 Szinuszos vivőjű, analog modulációs rendszerek

A moduláció során leggyakrabban szinuszos alakú vivőfrekvenciát alkalmazunk:

$$U(t) = U_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi), \quad \text{ahol}$$

$U(t)$ - a szinuszos vivőhullám pillanatnyi értéke

U_0 - a vivőhullám amplitúdója

ω - a vivőhullám körfrekvenciája

φ - a vivőhullám fázisa

Az összefüggésben szereplő U_0 , ω és φ bármelyike változtatható az információt tartalmazó moduláló jel szerint. A változtatott paraméter alapján, amplitúdómodulációt, frekvenciamodulációt, vagy fázisszögmodulációt hozhatunk létre.

9.1.1 Amplitúdómoduláció

Az egyszerűség kedvéért tegyük fel, hogy modulálásra egy Ω körfrekvenciájú U_{mod} csúcsértékű szinuszos hangfrekvenciás jelet használunk:

$$A = U_{mod} \cdot \sin(\Omega \cdot t)$$

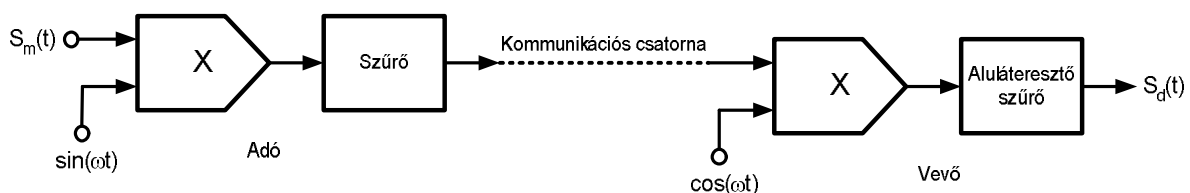
Ha ezzel a jellel az

$$u = U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

vivőhullám amplitúdóját moduláljuk, akkor a kimenő jel:

$$\begin{aligned} u_{ki} &= U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot U_{mod} \cdot \sin(\Omega \cdot t) = \\ &= U_0 \cdot U_{mod} \cdot \sin(\omega \cdot t) + \frac{U_0 \cdot U_{mod}}{2} \cos(\omega - \Omega) \cdot t + \frac{U_0 \cdot U_{mod}}{2} \cos(\omega + \Omega) \cdot t \end{aligned}$$

Az eredmény első tagjának frekvenciája nem függ a moduláló jel frekvenciájától. A második és harmadik tag frekvenciája a két jel frekvenciájának különbsége illetve összege. A keletkezett jelek nagyságát vizsgálva látható, hogy a kimeneten megjelenő vivő amplitúdója megegyezik a két új frekvencia (oldalfrekvencia) amplitúdójának összegével, mivel mindegyik oldalfrekvencia amplitúdója fele a vivő amplitúdójának. Ha a moduláló frekvencia nem egy konkrét frekvencia, hanem egy hangfrekvenciás tartomány vagy sáv, akkor a vivő alatt és felett nem oldalfrekvenciák, hanem oldalsávok jelennek meg az AM során. Az AM adás során a vivő nem hordoz információt. A két oldalsáv bármelyikéből előállítható a kisugárzott információ. A két kisugárzott oldalsáv a frekvenciasávban is több helyet foglal el, feleslegesen. A 9.2 ábrán egy amplitúdómodulált kommunikációs rendszer tömbvázlata látható, a 9.3 ábrán pedig az AM jel idődiagramja.

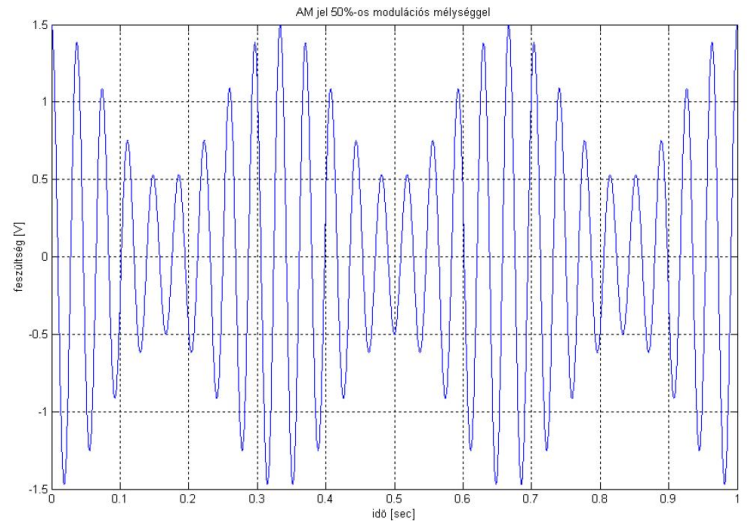


9.2 ábra Amplitúdó-moduláció/demoduláció tömbvázlata

Ha a vevőáramkör pontosan szintetizálni tudja az adó vivőfrekvenciáját, akkor:

$$S_a(t) = s(t)\cos \omega t = A \cdot \cos(\omega + \Omega) t \cdot (\cos \omega t) = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \cos \Omega + \frac{1}{2} \cdot A \cdot \cos(2\omega t)$$

A $2\omega t$ komponenst integrátorral (LPF) szűrhetjük ki és így megkapjuk a torzítatlan $S_m(t)$ jelet. Ennek a demodulációnak a nehézségét az jelenti, hogy a vevőben pontosan ismerni kell az adó $\omega \cdot t$ jelét (frekvencia és fázis).



9.3 ábra AM jel idődiagramja

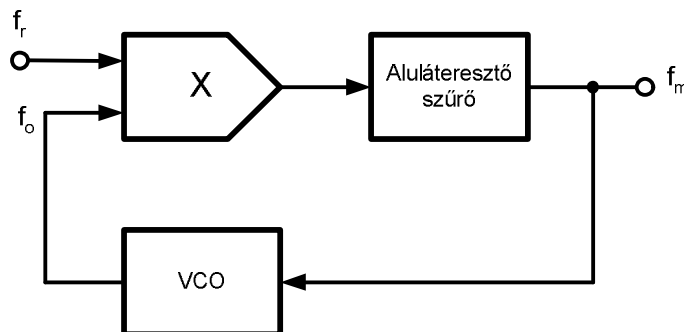
9.1.2 Szögmoduláció (frekvencia- és fázismoduláció)

A frekvencia és fázisszög moduláció azonos elven működik. A frekvenciamoduláció az elterjedtebb. Frekvencia moduláció esetén a vivőhullám pillanatnyi frekvenciája a moduláló jel pillanatnyi amplitúdójával arányos.

Frekvenciamodulációnál egy nagyfrekvenciás vivő frekvenciáját és ezzel együtt a szögét változtatjuk a kisfrekvenciás jel ütemében. Eközben az amplitúdó változatlan marad. Ezt egy LC oszcillátor esetén, az

$$f_v = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{L \cdot C}}$$

egyenlet alapján úgy érjük el, hogy a generátor frekvencia meghatározó rezgőkörének inductívását vagy kapacitását a jel-rezgés ütemében változtatjuk. A moduláló feszültség révén az eredetileg modulálatlan f_v vivőfrekvencia megváltozik, úgy, hogy a moduláló frekvencia ütemében és a moduláló feszültséggel egyenes arányban ingadozik egy f_2 maximum és egy f_1 minimum között. Az f_v -től a nagyobb vagy kisebb frekvenciáig terjedő kitérést frekvencialöketnek nevezzük. Legegyszerűbb a rezgőkör kapacitását vezérelni egy kondenzátormikrofon vagy kapacitásdióda segítségével (8.4 fejezet). A kapacitásdióda kapacitása a rávezetett jelfeszültség függvényében változik, a kondenzátor mikrofoné pedig közvetlenül a hangrezgés hatására.



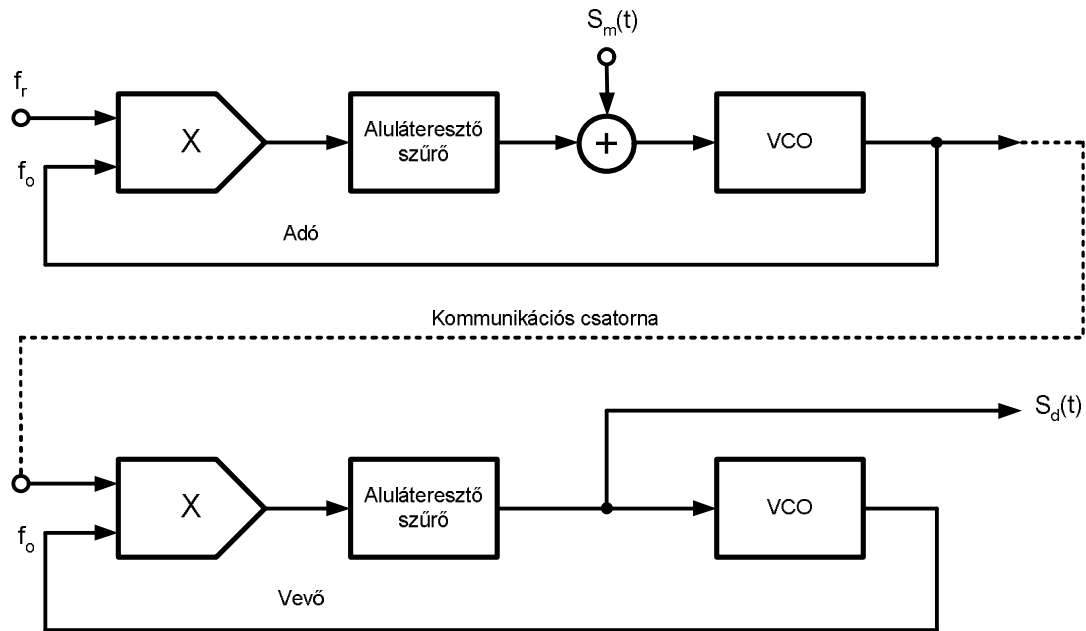
9.4 ábra Szögdemoduláció tömbvázlata

A demoduláció alapelve:

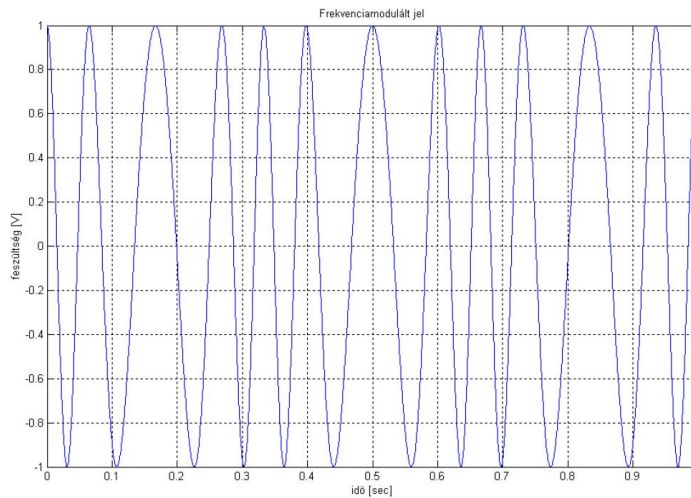
- a) a frekvencia- illetve fázismoduláció átalakítása amplitúdómodulációvá és
- b) az amplitúdómoduláció egyenirányítása.

A 9.4 ábrán megfigyelhető, hogy f_r -et változtatva megváltozik a szűrő kimenetén az egyenfeszültség is. A feszültségváltozás arányos a frekvenciaváltozással. Ha tehát a bemeneten f_r helyett FM jel van, akkor az egyenfeszültség az FM moduláló feszültségének megfelelően változik. Az aluláteresztő kimenetén fellépő szabályozó feszültség tehát megegyezik a moduláló jellel. A működés határát az aluláteresztő f_h határfrekvenciája jelenti (befogási tartomány).

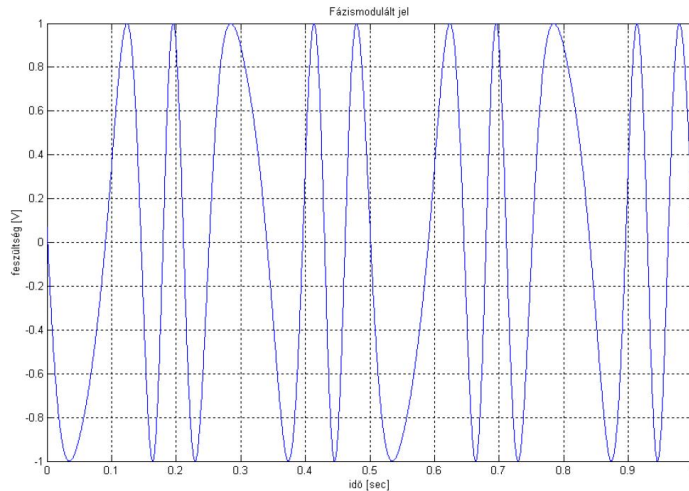
A 9.5 ábrán egy PPL technikára alapuló frekvenciamodulált kommunikációs rendszer tömbvázlata látható.



9.5 ábra Frekvenciamodulált kommunikációs rendszer tömbvázlata



9.6 ábra FM jel idődiagramja



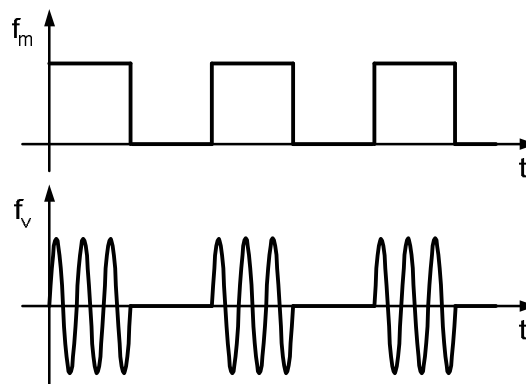
9.7 ábra PM jel idődiagramja

Az analóg modulációk jellemzője, hogy többé-kevésbé zajérzékenyek. A előbb említett modulációkkal multiplex rendszereket alakíthatunk ki. Ezeket frekvenciamultiplex rendszereknek nevezzük (FDM).

9.2 Szinuszos vívőhullámú digitális modulációs rendszerek

Az alábbi ábrákon a három legfontosabb szinuszos vívőhullámos digitális modulációs eljárás tanulmányozható:

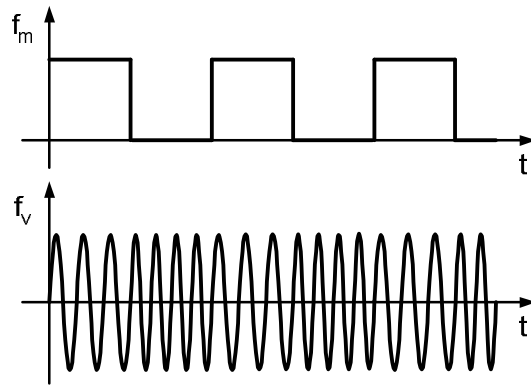
- Amplitúdóbillentyűzés (ASK): a konstans frekvenciájú vívőhullám ki-be kapcsolgatása a bináris (0/1) kódok folyamának megfelelően (9.8 ábra). Tehát az amplitúdó csak két értéket vehet fel. Az amplitúdóbillentyűzés egyik hátránya, hogy a két bináris állapot egyikét a nulla áram, vagy nulla feszültség jellemzi, amit nem lehet megkülönböztetni olyan zavartól, mint pl. a vezeték megszakadás vagy az adókiesés.



9.8 ábra ASK jel idődiagramja

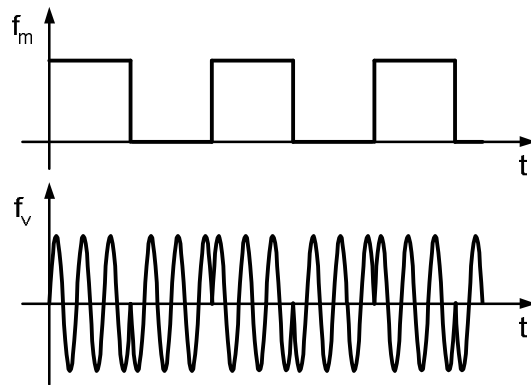
- Frekvenciabillentyűzés (FSK): Két egymástól jól elkülöníthető (szétszűrhető) frekvencia kapcsolgatása a bináris kódolásnak (0/1) megfelelően (9.9 ábra). A frekvenciameghatározó rezgőköri kapacitás egy részét egy kapcsolótranszisztor (vagy egy dióda) segítségével rákapcsolva vagy leválasztva már létrejön a kétféle frekvenciaállapot. Elképzelhető a rezgőköri induktivitás változtatása is az előzőekben meghatározott módon. Frekvenciabillentyűzésnél gyakorlatilag nem lehet kvarcstabilizált generátort közvetlenül alkalmazni, ha eltekintünk attól a

megoldástól, hogy a névleges frekvenciákon rezgő két kvarcgenerátor között kapcsolgassunk át, vagy bonyolult PLL kapcsolást alkalmazunk.



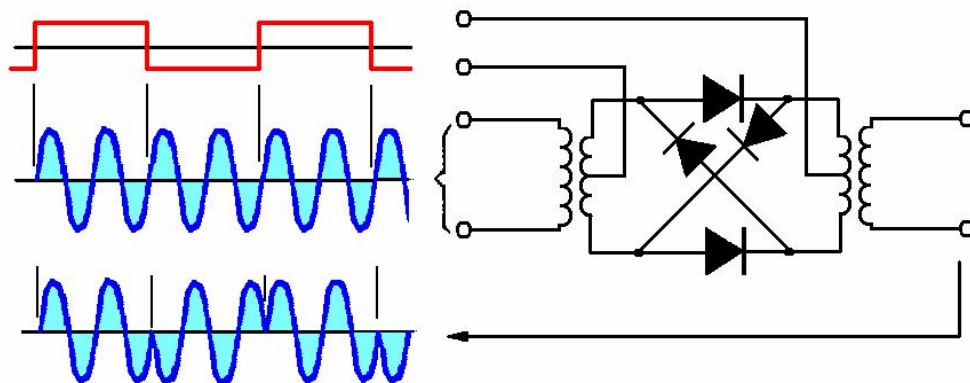
9.9 ábra FSK jel idődiagramja

- Fázisbillyüzés (PSK): A frekvencia változatlan, de a vivő fázisa 180° -t ugrik a bináris jelváltozásokkor (9.10 ábra).



9.10 ábra PSK jel idődiagramja

A 9.11 ábrán egy fázisbillyüző áramkör elvi megvalósítása látható. Az ábra szerint, ha a diódákat a bináris jelnek megfelelően négyszögjellel kapcsolgatjuk, akkor a vivő pozitív bináris jelnél az eredeti fázishelyzetben halad tovább, negatív bináris jelnél pedig ellenkező polaritással, tehát 180° -os fáziseltolással.



9.11 ábra Fázisbillyüző áramkör

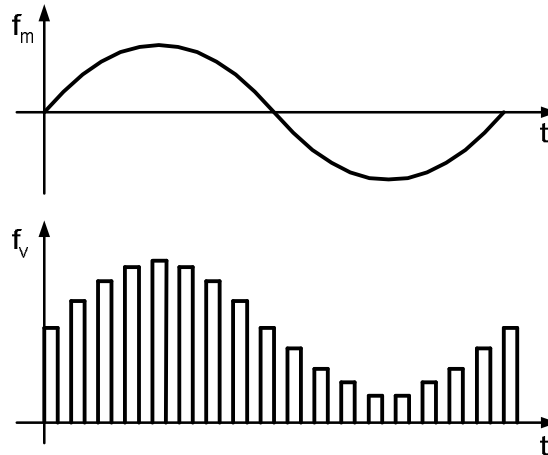
9.3 Pulzusmodulációs rendszerek

Ellentétben a szinuszos vivőjű modulációval, az impulzus vivőjű moduláció időben nem folytonos, hanem diszkrét. Az impulzus vivőjű moduláción belül is kialakíthatunk két modulációs csoportot:

- Folytonos amplitúdójú moduláció
- Diszkrét amplitúdójú moduláció

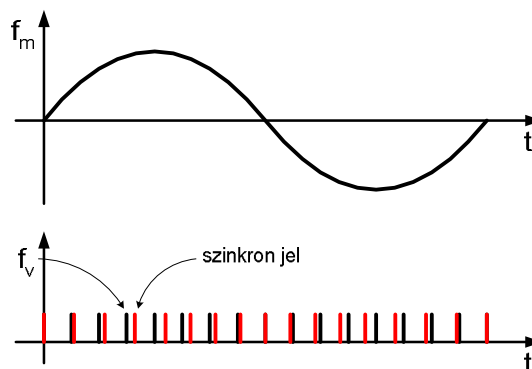
Folytonos moduláló jel esetén kétféle modulációs eljárás alkalmazható:

- Pulzusamplitúdó moduláció (PAM): a pulzussorozat amplitúdóját modulálja a továbbítandó jel. PAM-ról abban az esetben beszélünk, amikor egy impulzus sorozatot használunk vivőhullámnak és ezen a vivőhullámon valósítjuk meg az amplitúdómodulációt.



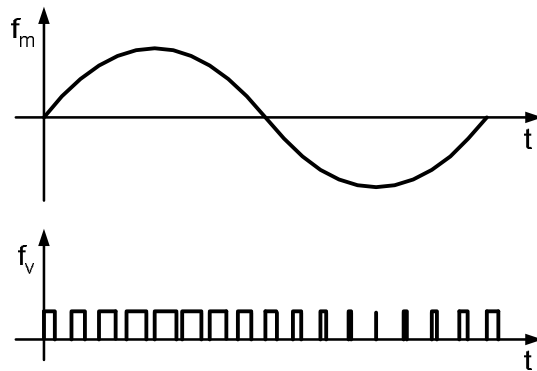
9.12 ábra PAM jel idődiagramja

- Pulzusidő moduláció (PTM): a pulzussorozat valamelyik paraméterének az időbeli elfordulását modulálja a továbbítandó jel. Ezen belül több megoldás lehetséges:
 - Pulzushelyzet moduláció (PPM): a vivő pulzusainak a helyzetét (fázisát) modulálja a továbbítandó jel. A PPM modulációs eljárás során mind az impulzus amplitúdója mind a szélessége konstans. Minden impulzus egyforma, csak az impulzusok távolsága nem konstans. Az információt az egyes impulzusok fáziseltérése hordozza.



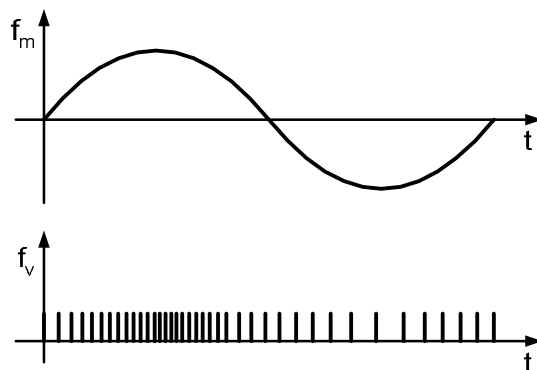
9.13 ábra PPM jel idődiagramja

- Pulzusidőtartam moduláció (PWM): olyan pulzus-idő moduláció, melyben a vivő pulzusainak a szélességét (időtartamát) modulálja a továbbítandó jel.



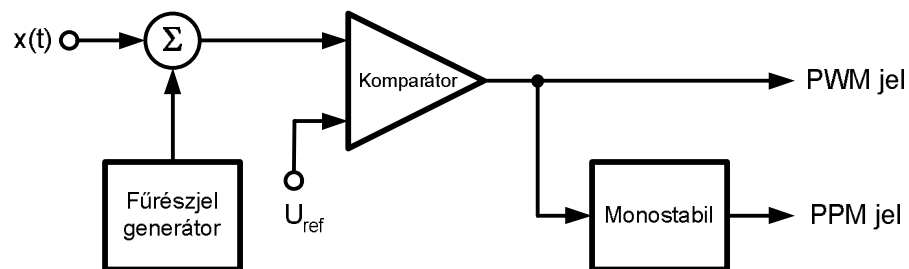
9.14 ábra PWM jel idődiagramja

- Pulzusfrekvencia moduláció (PFM): olyan moduláció, melyben a vivő pulzusainak a pillanatnyi frekvenciáját (az időegység alatti pulzusok számát) modulálja a továbbítandó jel.



9.15 ábra PFM jel idődiagramja

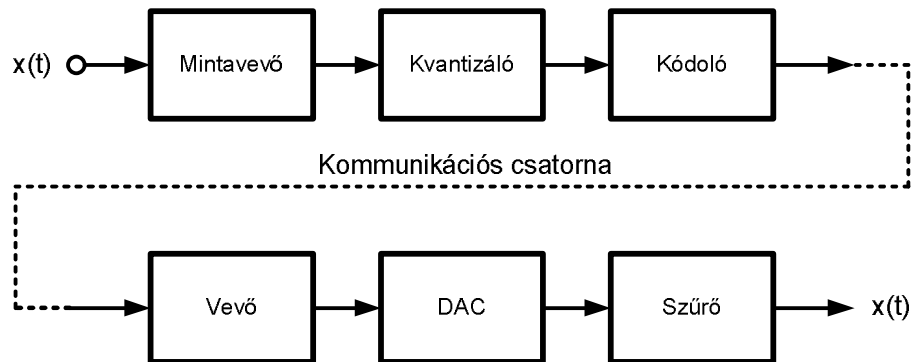
A 9.16 ábra a PPM és PWM jelek előállításának elvi áramkörét szemlélteti. A tömbvázlat az előző fejezetekben tanulmányozott áramköri modulokat tartalmaz.



9.16 ábra PPM és PWM jelek előállításának elve

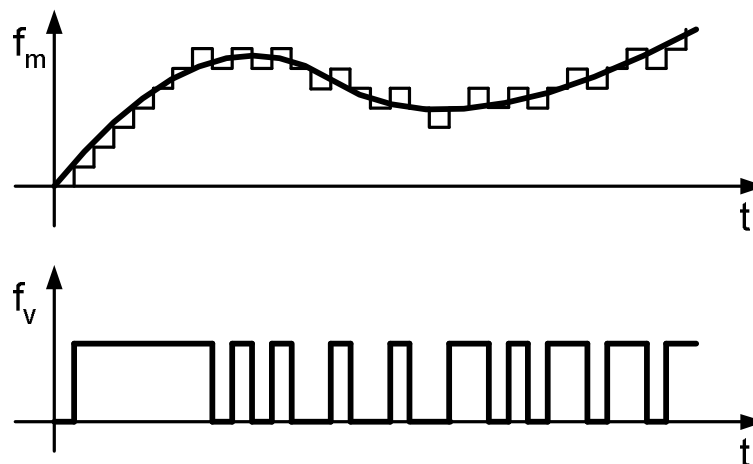
Diszkrét moduláló jel esetén a következő modulációs eljárásokat alkalmazhatjuk:

- Pulzuskód moduláció (PCM): az impulzussorozat csak közvetett módon, kódolva tartalmazza a továbbítandó jelet. Ha egy analóg forrásjelből mintákat veszünk, és e mintákat kvantizáljuk, akkor az így nyert minták továbbíthatók egy PAM rendszeren. Az egyes mintákat azonban egy alkalmas kódszámmal is jelölhetjük és a kvantizált minták helyett ezeket a kódszámokat továbbíthatjuk. A kódolásnak végtelen sok fajtája lehet. A PCM rendszer tömbvázlata a 9.17 ábrán látható.



9.17 ábra PCM rendszer tömbvázlata

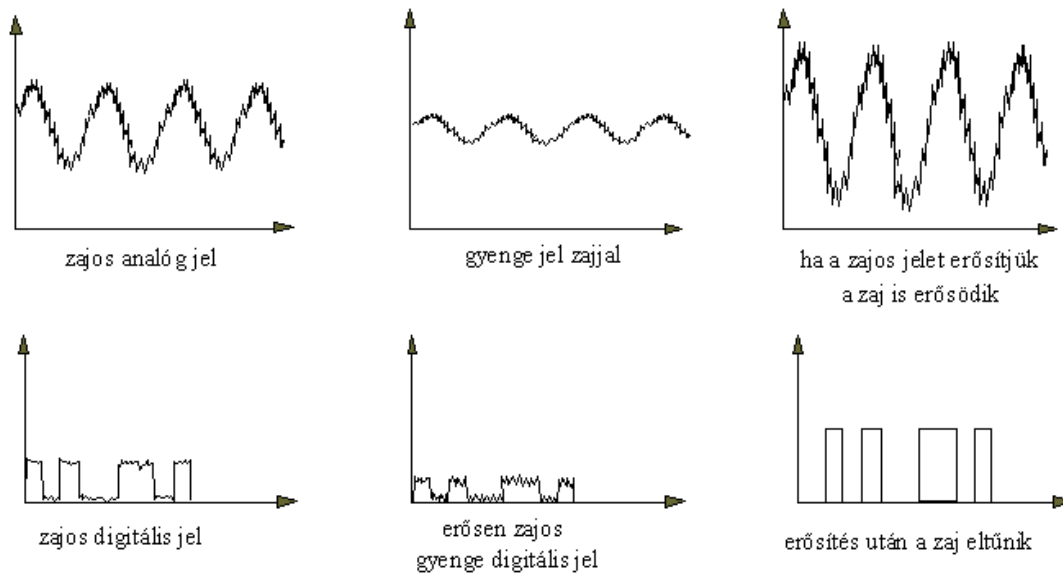
- Deltamoduláció (DM): egybites digitizálási eljárásnak is nevezik (9.18 ábra). Egyszerűsége mellett olcsó, mert nem szükséges D/A konverter a vevőoldalon. Elsősorban beszéd (nem túl meredek jelek) digitizálásánál terjedt el.



9.18 ábra A deltamoduláció elve

A digitális rendszerek előnyei

A digitális kommunikáció legnagyobb hátránya az, hogy nagy sávszélességet igényel. A mérnökök mégis megfizetik ezt az árat a rendszer előnyei miatt. A digitális rendszer legfőbb előnye az, hogy figyelemre méltóan érzéketlen a zajokkal szemben. A nagy távolságú összeköttetéseknel ez a legfontosabb tényező. Különösen a műholdas kommunikációban van ez így, melyben a rendelkezésre álló teljesítmény kicsi, s így a jel/zaj hányados értéke alacsony. A szemléltetés kedvéért a 9.19 ábra bemutatja a zaj hatását mind az analóg, mind a digitális jelre.



9.19 ábra A zaj hatása az analóg és a digitális jelre

Az analóg jel esetében a rákerült zaj nem választható le, hiába erősítjük, a zaj is erősödni fog, ami előbb-utóbb meghamisítja a jel eredeti információtartalmát. A digitális jelek esetében, az információt csupán két, különböző jelszint hordozza, ezért könnyű a jel közepén definiálni egy küszöbértéket, és visszaállítani az eredeti információtartalmat. A küszöbszint alatti érték 0, a fölötte levő 1 lesz. Másik előnye a digitális kommunikációnak a (viszonylag) alacsony ára. A digitális áramköri elemek tömegtermeléssel sokkal olcsóbban állíthatók elő, sokkal megbízhatóbbak és kompaktabbak, mint az analóg áramkörök.