

3. Analóg jelek átvitele analóg csatornán. A moduláció

Jelforrásaink jelentős hányada (pld. a mikrofonok, videokamerák) az időben folytonos (un. analóg) jelet állítanak elő, mely esetekben a jel (egy elektromos feszültség) a hangnyomás váltakozásával, vagy a képtartalom fény-intenzitás változásával stb. arányos. Jelen fejezetben azt a technológiai hátteret fogjuk tárgyalni, ami lehetővé teszi ezen jelek lehetőség szerinti kis torzítással történő gazdaságos továbbítását.

3.1. A moduláció célja

Az elektromos jelként rendelkezésre álló információ nagy távolságra történő továbbítására két lehetőségünk van: az elektromos kábel illetve a rádió csatorna. Kábel alkalmazása akkor lesz gazdaságos, ha több felhasználó egyszerre, egymás zavarása nélkül tudja használni ugyan azt a kábelt. Rádió csatornában a többszörös felhasználói igény pedig természetes követelmény. A csatorna többszörös kihasználása a *frekvencia osztási elv* (Frequency Division Multiplex, **FDM**) alkalmazásával lehetséges, amit az un. **modulációval** valósítunk meg. Az alkalmazott elv a jelek frekvencia tartománybeli reprezentációja (spektruma) alapján érthető meg. Ennek lényege: az átvinni kívánt jel (az alapsávi jel) spektrumát az alapsávból modulációval egy másik (tetszőlegesen választott) frekvencia sávba helyezzük át. Ebben a sávban történik meg az átvitel, majd a vételi oldalon a demodulációs eljárás következtében a jel visszakerül az alapsávba, azaz megtörténik a jel rekonstruálása.

A modulációval a többszörös csatorna kihasználás megvalósítható. Rádió csatornák esetében nemzetközi szervezetek és nemzeti hatóságok rendelkeznek az egyes használható frekvencia sávokról.

Rádió csatorna esetében a modulációnak (frekvencia transzpozíciónak) egy járulékos hatása is jelentkezik, ugyanis a jel ekkor egy olyan frekvenciasávba kerül, mely sávban a jel egy antennával lesugározhatóvá válik. Mint tudni lehet, hogy egy antenna akkor tud hatékonyan nagy távolságban elektromágneses hullámokat kelteni, ha mérete összemérhető a jel hullámhosszával. Az alapsávi jel tipikusan olyan kisfrekvenciás összetevőket tartalmaz, melyekhez tartozó hullámhossz nagyon nagy és így irreális antenna méretek adódnának ki.

3.2. Frekvencia tartománybeli reprezentáció: a spektrum (Ajánott olvasmány)

Ismeretes, hogy a periodikus függvényeket (jeleket) előállíthatjuk *Fourier-sorukkal*. Ha $x(t)$ egy T szerint periodikus jel, akkor felírható az alábbi sor alakjában:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} X_k e^{j2\pi k f_0 t} \quad (3.1.)$$

ahol az : $e^{j2\pi k f_0 t} = \cos(2\pi k f_0 t) + j \sin(2\pi k f_0 t)$ (3.2.)

az *Euler-féle*, $f_0 = 1/T$ frekvenciájú, komplex értékű, általánosított harmonikus függvény.

(A j az imaginárius egység: $j = \sqrt{-1}$)

A sor k -ik együtthatóját az $x(t)$ függvényből az alábbi integrállal számíthatjuk ki:

$$X_k = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) e^{-j2\pi k f_0 t} dt \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \infty \quad (3.3.)$$

A (3.1.) összefüggés azt fejezi ki, hogy a periodikus $x(t)$ jel előállítható az f_0 frekvencia. egész számú többszörösei: kf_0 , ($k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$) szerinti harmonikus rezgések (sinus, cosinus) összegeként. Az összefüggésben az X_k együttható fizikai jelentéssel bír: a k -ik harmonikus komponens (általában komplex értékű) amplitúdója. Az általában megszámlálhatóan végtelen hosszú X_k sorozatot a jel frekvencia tartománybeli reprezentációjának (spektrumának) tekinthetjük, mivel a (3.1.) definíció szerint belőle az $x(t)$ időtartománybeli reprezentáció egyértelműen visszaállítható.

Ha az $x(t)$ jel aperiodikus (nem periodikus), akkor is értelmezhetünk spektrumot a (3.3.) –hoz hasonló módon. Az aperiodikus jelet mint végtelen periódusú jelet kezeljük a $T \rightarrow \infty$ határátmenet segítségével. Ekkor persze az alapharmonikus frekvenciája, (az f_0) a zérushoz tart. A határátmenet során a felharmonikusok végtelen diszkrét sorozata a frekvencia folytonos függvényévé alakul át. ($X_k = X(kf_0) \rightarrow X(f)$)

$$X(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) e^{-j2\pi f t} dt = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (3.4.)$$

A fenti kifejezést hívják *Fourier-integrálnak* (*Fourier-transzformációnak*), ami az aperiódikus jel spektrumát adja eredményül. Bizonyítható, hogy ha $x(t)$ abszolút integrálható függvény, akkor a (3.4.) improprius integrál létezik.

Ugyancsak bizonyítható, hogy ha a frekvencia tartománybeli $X(f)$ létezik, akkor belőle az időtartománybeli reprezentáció egyértelműen visszaállítható. Ezt nevezik inverz Fourier-transzformációnak:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) e^{j2\pi f t} df \quad (3.5.)$$

Ha a fenti összefüggés fizikai tartalmát keressük, akkor érdemes azt a (3.1.) szerinti kifejezéssel összevetni. Az integrálás itt is összegezést jelent. Az exponenciális tényező az f frekvenciájú, komplex harmonikus összetevőt írja le, melynek az általában komplex értékű amplitúdója: $dA = X(f)df$. Ily módon tehát az aperiódikus jelek spektrumának fizikai jelentéséről azt mondhatjuk, hogy: $X(f)$ egy (spektrális) amplitúdó sűrűség függvény.

Determinisztikus (periódikus, aperiódikus) jelek távközlő csatornákon történő továbbításának csak mint mérőjeleknek van jelentőségük. A valóságos műsorjelek inkább tekinthetők véletlen változó (*sztochasztikus*) folyamatoknak.

A véletlen változó (nem determinisztikus) jeleg azt jelenti, hogy nem tudunk adni például egy képletet, ami leírná magát a jelet. A folyamatot csak statisztikáival tudjuk jellemezni, melyek viszont determinisztikus függvények.

A műsorjelek modellezése szempontjából is kiemelkedő fontosságúak az u.n. *stacionárius folyamatok*, melyeknél azt a tulajdonságot kívánjuk megragadni, hogy a jel bizonyos statisztikái (az első és másodrendű eloszlásfüggvényei) nem függenek az időtől. A stacionárius folyamatokra már értelmezhető az u.n. teljesítmény sűrűség spektrum, amihez az autokorrelációs függvényen keresztül juthatunk el.

A valós értékű $\xi(t)$ sztochasztikus folyamat akkor (legalább gyengén) stacionárius, ha:

1. várható értéke nem függ az időtől,

$$m_{\xi} = \mathbf{E}\{\xi(t)\} = \text{const.} \quad (3.6.)$$

2. a $\xi(t)$ és $\xi(t + \tau)$ szorzatának várható értéke (az autokorrelációs függvény) nem függ a "t" időtől, csak a "τ" idő különbségtől:

$$R_{\xi}(\tau) = \mathbf{E}\{\xi(t)\xi(t + \tau)\} \quad (3.7.)$$

(A fenti várható értékek (*Expected value*-k) az eloszlás- ill. az együttes eloszlás függvényekből számíthatók ki.)

Az autokorrelációs függvény ismeretében a spektrális teljesítmény sűrűség függvény a Fourier-integrál segítségével már számolható:

$$S_{\xi}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{\xi}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (3.8.)$$

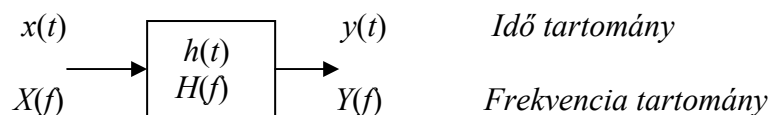
(Az $S_{\xi}(f)$ függvény inverz Fourier-integrálja természetesen az autokorrelációs függvényt adja vissza.)

Bizonyítható, hogy $S_{\xi}(f)$ valós, páros, nemnegatív függvény. Belátható a fizikai jelentése is: a $\xi(t)$ sztochasztikus jelnek az f frekvencia df infinitezimális környezetébe eső teljesítmény ésszetevőjét adja meg. (Ezért spektrális teljesítmény *sűrűség* függvény.)

A továbbiakban determinisztikus jelek segítségével fogjuk a modulációt tárgyalni, (annak ellenére, hogy mint említettük a műsor jelekre reálisabb a sztochasztikus jel modell), mert ez a modell az egyszerűbb. Természetesen a sztochasztikus jelekkel számolva is azonos eredményeket kapnánk.

3.3. A szűrés (Ajánott olvasmány)

A jelek kezelésének, feldolgozásának fontos eszközei a lineáris, idő invariáns, kauzális és stabil rendszerek. A rendszeren egy olyan szerkezetet értünk, melynek van (legalább) egy bemenete (input) és van (legalább) egy kimenete (output).



Adjunk a rendszer bemenetére egy tetszőleges $x_1(t)$ jelet. A rendszer válasza legyen az $y_1(t)$ jel. Ismételjük meg a kísérletet egy másik $x_2(t)$ jellel. A kimenet legyen ekkor az $y_2(t)$. A rendszer *lineáris*, ha a bemenet az $x(t) = c_1 x_1(t) + c_2 x_2(t)$ és ekkor a kimenet: $y(t) = c_1 y_1(t) + c_2 y_2(t)$ alakú (c_1, c_2 tetszőleges konstansok).

A rendszer *idő invariáns* (az időtől független), ha az $x_2(t) = x_1(t-T)$ esetén igaz, hogy az $y_2(t) = y_1(t-T)$, ahol T tetszőleges állandó.

Adjunk most a bemenetre a $t = 0$ időpontban egy végtelenül keskeny és végtelenül nagy amplitúdójú (*Dirac-delta*) impulzust ($x(t) = \delta(t)$)! Erre a speciális jelre adott válasz

jelet hívjuk a rendszer $y(t)=h(t)$ *súlyfüggvényének*. A súlyfüggvény az időtartományban egyértelműen jellemzi a rendszert.

Egy rendszer *kauzális*, ha igaz rá, hogy: $h(t) = 0$, ha $t < 0$. A kauzalitás azt az oksági összefüggést fejezi ki, hogy a rendszer válasza nem előzheti meg az időben a gerjesztés időpontját, ami a $t = 0$ pillanatban volt.

Egy lineáris, idő invariáns és kauzális rendszer akkor *stabil*, ha akármilyen, de korlátos bemeneti jelre ($|x(t)| < K < \infty$) a kimenet is korlátos marad ($|y(t)| < L < \infty$). Bizonyíthatóan ennek szükséges és elégséges feltétele a súlyfüggvény abszolút integrálhatósága:

$$\int_0^{\infty} |h(t)| dt < \infty$$

Tetszőleges bemenő jelre a rendszer válaszát az alábbi konvolúciós integrállal számíthatjuk ki a súlyfüggvény ismeretében:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) x(t - \tau) d\tau \quad (3.9.)$$

Ennek az integrálnak a kiszámítása gyakran hosszadalmas és nehéz. Egyszerűbben jutunk eredményre, ha áttérünk a frekvencia tartománybeli leírásra. Jelölje rendre $X(f)$, $Y(f)$ és $H(f)$ az $x(t)$, $y(t)$ és $h(t)$ Fourier-integráltjait! Itt most csak a $h(t)$ Fourier-traszformáltját írjuk le, amit *átviteli függvénynek* nevezünk:

$$H(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.10.)$$

A frekvencia tartományban a kimenet és a bemenet kapcsolata bizonyíthatóan (a (3.9.)-nél jóval egyszerűbb) összefüggés lesz:

$$Y(f) = H(f) X(f) \quad (3.11.)$$

A komplex értékű $H(f)$ átviteli függvényt két másik függvény segítségével is felírhatjuk:

$$H(f) = A(f) e^{j\varphi(f)} \quad (3.12.)$$

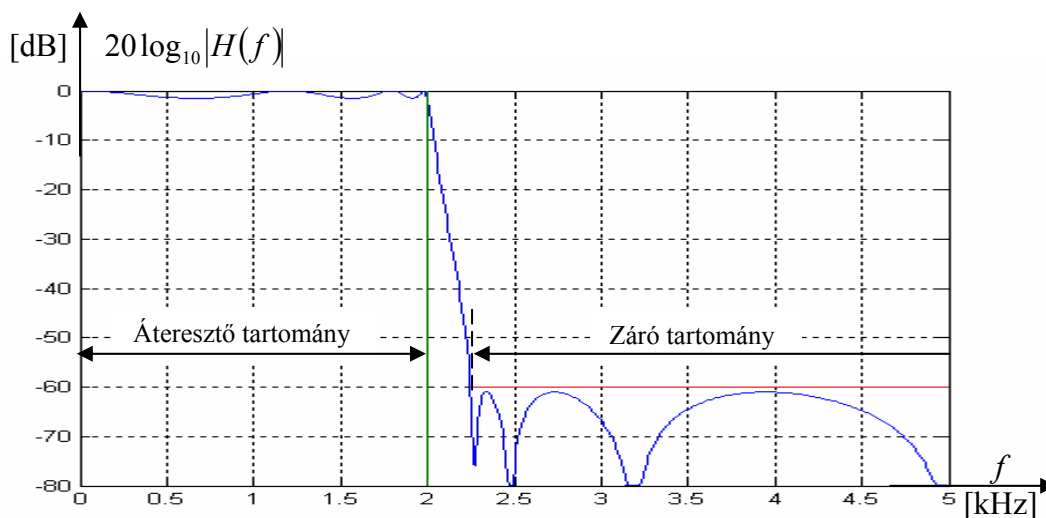
Itt: az $A(f)$ az amplitúdó- és a $\varphi(f)$ az un. fázis karakterisztika (mindkettő valós függvény).

A (3.12.) szerinti felbontás egyben egy praktikus mérési eljárását is adja az átviteli függvénynek. Ha egy lineáris rendszerre f frekvenciájú szinuszos jelet kapcsolunk, akkor a kimeneti jel is f frekvenciájú szinuszos jel lesz, melynek más lesz az amplitúdója és a fázisa is el fog térni a bemeneti jel fázisától. A kimeneti és a bemeneti amplitúdók aránya az $A(f)$ értékét, a két jel fázisa közötti különbség a $\varphi(f)$ értékét adja.

A fentebbi jel- és rendszerelméleti összefoglaló után térjünk vissza a szűrés témakörére! Szélesebb értelemben a lineáris, idő invariáns és stabil rendszereket *szűrőknek* nevezik. *Szűkebb értelemben* azokat a rendszereket nevezik *szűrőknek*, melyeknek a $H(f)$ átviteli függvénye speciális. Bizonyos frekvencia tartományban az amplitúdó karakterisztika egy véges konstans értéket (áteresztő tartomány), míg más tartományokban a zérus értéket

közelíti (záró tartomány(-ok)). (A közelíti kifejezés azért indokolt, mert a szigorúan konstans érték nem valósítható meg, csak tetszőleges mértékben megközelíthető.)

Attól függően, hogy az áteresztő sáv hol helyezkedik el a frekvencia tengelyen, beszélhetünk aluláteresztő-, feluláteresztő-, vagy sávszűrőről.



3.1. ábra Egy aluláteresztő szűrő amplitúdó karakterisztikája logaritmus (dB) skálán

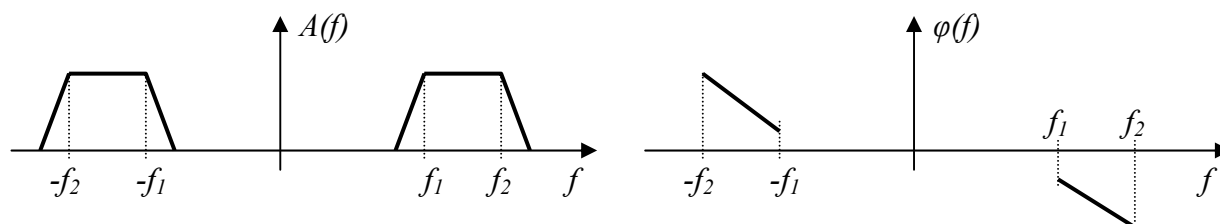
A fenti ábrán az átvitel a (0-2 kHz) sávban az “1” értéket közelíti (= 0 dB), míg a záró sávban a kívánt zérustól maximálisan 0.001 értékben (-60 dB) tér csak el.

Ha a jel hasznos és zavaró (zaj) komponensekből áll, a szűrőkkel azokat a zavaró jel komponenseket tudjuk eltávolítani, amelyeknek a spektrumi a szűrő záró tartományába esnek, miközben a hasznos jel spektruma az áteresztő sávjában helyezkedik el.

Ha a jel spektruma az $[f_1, f_2]$ frekvencia sávba esik és azon kívül zérus, akkor **sávhatárolt jelről** beszélünk. (f_1 lehet zérus is). Sávhatárolt jelek akkor haladnak át egy rendszeren (csatornán) *torzítás mentesen* (jelalak hűen), ha ebben a sávban teljesül az alábbi két feltétel:

1. Az amplitúdókarakterisztika: $A(f) = \text{konstans} = A_0$ (3.13.)
2. A csoportfutási idő karakterisztika:

$$\tau(f) = -\frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(f)}{df} = \text{konstans} = T_0 \quad (3.14.)$$



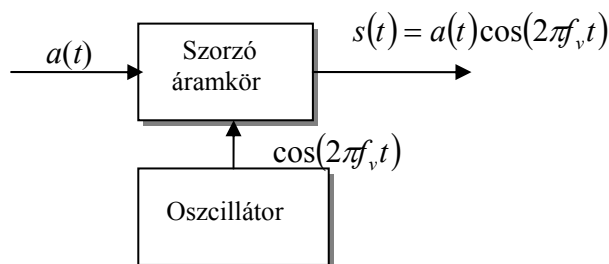
3.2. ábra Egy ideális sávszűrő amplitúdó és fázis karakterisztikája

A csoportfutási-idő karakterisztika akkor konstans, ha a fáziskarakterisztika lineáris függvénye a frekvenciának a kérdéses frekvencia tartományban.

Ha a jel minden komponense T_0 időt késik, és A_0 -szoros amplitúdójúvá válik (azaz a jel alakhű marad), akkor azt nem tekintjük torzításnak.

3.4. A keverés (frekvencia transzpozíció)

A jel spektrumának áthelyezését (a frekvencia transzpozíciót) végző egységet *keverőnek* (mixer, converter) nevezzük. Ez az egység az alapsávi $a(t)$ jelet összeszorozza egy szinuszos (koszinuszos) jelet előállító oszcillátor jelével. Az oszcillátor f_v frekvenciája az a vivőfrekvencia, aminek környezetébe a jel spektrumát át kívánjuk helyezni.



Az alapsávi $a(t)$ jel spektruma:

$$A(f) = \int_{-\infty}^{\infty} a(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (3.15.)$$

Legyen ez a jel *sávhatárolt*, ami azt jelenti, hogy:

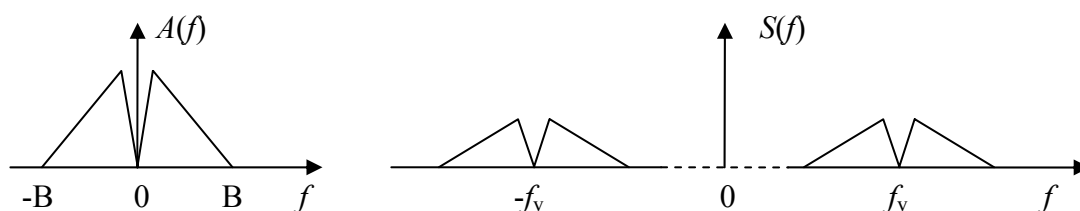
$$A(f) = 0 \text{ ha } |f| > B : \text{(Bandwidth) a sáv szélesség.}$$

A keverés után a jel spektruma:

$$\begin{aligned} S(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j2\pi f t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} a(t) \cos(2\pi f_v t) e^{-j2\pi f t} dt = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} a(t) \frac{1}{2} [e^{j2\pi f_v t} + e^{-j2\pi f_v t}] e^{-j2\pi f t} dt = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} a(t) e^{-j2\pi (f-f_v) t} dt + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} a(t) e^{-j2\pi (f+f_v) t} dt = \\ &= \frac{1}{2} A(f-f_v) + \frac{1}{2} A(f+f_v) \end{aligned} \quad (3.16.)$$

(Itt felhasználtuk a $\cos(x) = \frac{e^{jx} + e^{-jx}}{2}$ azonosságot.)

A (3.16.)-ból azt olvashatjuk ki, hogy a keverő bemenő jelének spektruma a $\pm f_v$ vivőfrekvencia környezetébe tevődött át. Ezt szemlélteti az alábbi ábra:



3.4. ábra A keverés eredménye: a spektrum áthelyeződik

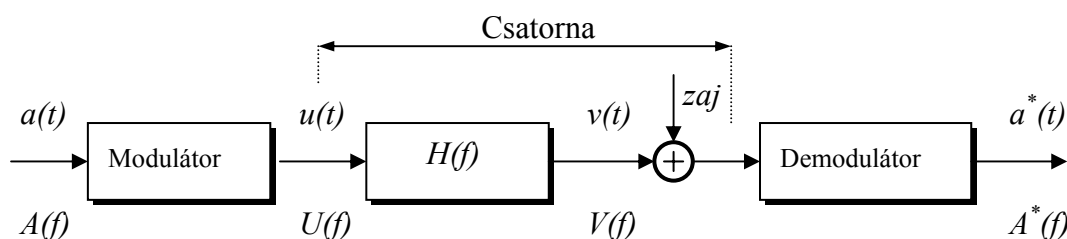
3.5. Analóg modulációs eljárások

Motiváció: Folytonos idejű jelforrás jelét kívánjuk lehetőleg torzításmentesen átvinni a rendelkezésre álló (a folytonos idejű jelek átvitelére alkalmas) ún. *analóg* csatornán.

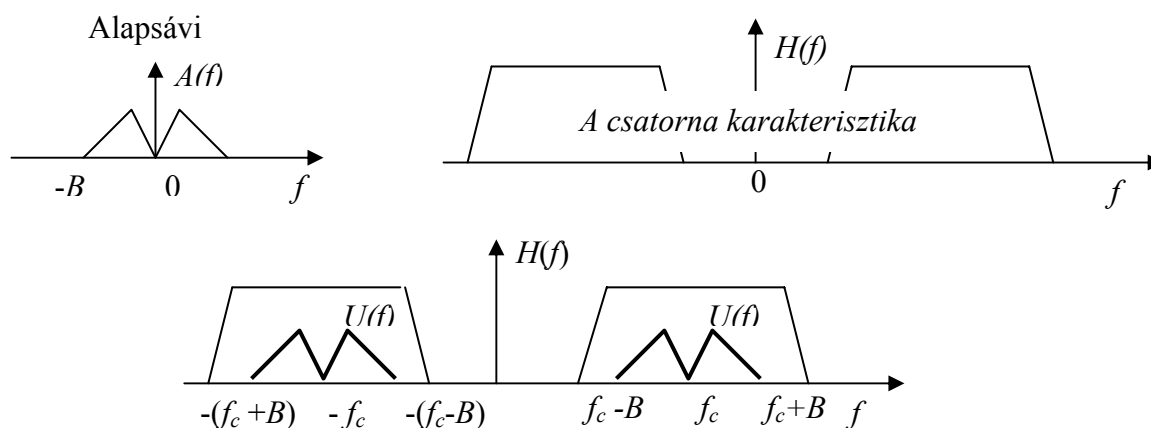
A moduláció célja:

- A jelforrás jelének (alapsávi jel) illesztése a csatornához.
- A csatorna többszörös kihasználhatósága (FDM)
- A jel kisugározhatósága (rádió csatorna).

A modulációs eljárás elsősorban a jel spektrumát helyezi át a csatorna számára kedvező sávba (frekvencia transzpozíció). A vételi oldalon elhelyezkedő *demodulátor* a spektrum alapsávba (az eredeti sávba) történő visszahelyezését hivatott elvégezni.

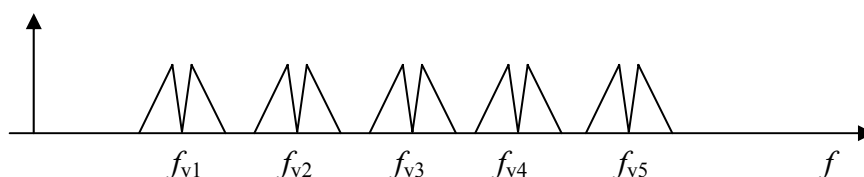


3.5. ábra Az átviteli lánc



3.6. ábra A jel illesztése a csatornához

A csatorna többszörös kihasználása úgy történhet meg, hogy az alapsávi jeleket ugyanazon modulációs eljárással különböző frekvenciaeltolásnak vetjük alá, majd ezeket az áthelyezett spektrumú jeleket összeadjuk a csatornában. Ezt a módszert nevezzük frekvencia nyalábolásnak (multiplexálásnak). Szokásos elnevezés: FDM (Frequency Division Multiplex)



3.7. ábra A többszörös csatorna kihasználás

A vételi oldalon az egyes jelek *szétválogatását* a különböző frekvenciákra hangolt *sáváteresztő szűrők* alkalmazásával végezzük el. Ezek a szűrők az adott sávba eső jelet átengedik, míg az összes többi igen erősen csillapítják (gyakorlatilag nem engedik át). A sávszűrt jel kerül ezután a demodulátorra, ami az alapsávi jelet állítja vissza.

A rádiócsatorna maga az elektromágneses hullámokat továbbító tér. Az adóberendezés akkor tud *hatékonyan* elektromos hullámokat keltetni, ha az antenna mérete (h) összemérhető a kisugározott jel (λ) hullámhosszával ($h \approx \lambda$). Mivel $\lambda = c/f$ (ahol c a fény terjedési sebessége), a modulációval járó frekvenciasáv áthelyezésre azért is szükség van, hogy elfogadható antenna méreteket kapjunk.

(Gondoljunk pld. a mobil telefonra, melynél a frekvenciasáv 1 GHz környékére esik, ahol a hullámhossz 30 cm és így az antenna pár centiméteres lehet.)

A modulált jel általános alakja:

$$s(t) = U(t) \cos \Theta(t) \quad (3.17.)$$

Amplitúdó modulációról akkor beszélünk, ha az alapsávi jelet $U(t)$ tartalmazza és $\Theta(t) = \omega_v t$, míg *szög modulációról* (frekvencia- ill. fázismodulációról) akkor, ha $U(t)$ konstans és $\Theta(t)$ hordozza valamilyen módon az átvenni kívánt információt.

Az amplitúdó modulációt lineáris modulációnak is szokás nevezni, mert a modulált jel spektruma a moduláló jel spektrumának egy frekvenciában eltolts változata, míg a szög modulációnál a vivő frekvencia körüli spektrumkép egyáltalán nem hasonlít az alapsávi spektrumhoz.

3.6. Amplitúdó modulációs eljárások (AM)

Az amplitúdó modulációnak számos módozata használatos:

- **Két oldalsávós AM (AM DSB: Double Side Band)**

$$s_{AM}(t) = [U_v + a(t)] \cos \omega_v t = U_v \cos \omega_v t + a(t) \cos \omega_v t \quad (3.18.)$$

A vivőhullám is kisugárzásra kerül. Egyszerűen demodulálható. Hosszú- közép- és rövidhullámú rádióadások modulációs eljárása.

- **Két oldalsávós, elnyomott vivőjű AM: (AM DSB/SC :Supressed Carrier)**

$$s_{AM}(t) = a(t) \cos \omega_v t \quad (3.19.)$$

A vivőhullám nem kerül kisugárzásra. A demoduláció bonyolultabb (koherens demodulator szükséges).

- **Egy oldalsávós, elnyomott vivőjű AM: (AM SSB/SC : Single Side Band Supressed Carrier)**

Sávtakarékos eljárás, mivel csak az egyik oldalsáv kerül kisugárzásra. Bonyolultabb eljárás, rövidhullámú (főleg katonai) alkalmazásokban használják.

- **Kvadratúra amplitúdó moduláció: (QAM)**

Elyomott vivőjű, két oldalsávós modulációs eljárás, melyben két, egymástól független jel ($i(t)$ és $q(t)$) átvitelét lehet megvalósítani:

$$s_{QAM}(t) = i(t)\cos\omega_c t - q(t)\sin\omega_c t \quad (3.20.)$$

A demodulálás feltételez egy segéd (pilot) jelet, ami a koherens demodulációhoz szükséges. Ennek hiányában a két csatorna között áthallás lép fel. Speciális feladatokban alkalmazzák.

3.7. Szögmodulációk

Ezeknél a modulációs eljárásoknál a vivőhullám amplitúdója állandó, az információt annak a pillanatnyi fázisa tartalmazza valamilyen módon. (Ezért nemlineáris modulációnak is nevezik, mivel a moduláló jel a koszinusz függvény argumentumában van elrejtve.)

:

$$s(t) = U_v \cos\Theta(t) \quad (3.21.)$$

A pillanatnyi frekvencia:

$$\omega_p = \frac{d\Theta(t)}{dt} \quad (3.22.)$$

A nemlinearitás miatt a modulált jel spektruma jelentősen eltér az alapsávi jel spektrumától. A modulált jel sáv szélessége általában jóval nagyobb az alapsávi jel sáv szélességénél. A nyereség abban jelentkezik, hogy még zajos csatorna esetén is kisebb zaj érhető el a vevőben a demodulálás után, mint ami az AM rendszerekkel elérhető.

- **Fázis moduláció: (Phase Modulation: PM)**

Fázismoduláció esetén a vivő pillanatnyi fázisa arányos az $a(t)$ moduláló jellel:

$$\Theta(t) = \omega_v t + K_{PM} a(t) \quad (3.23.)$$

Jellemző adat az u.n. *fázis löket*, ami azt mutatja meg, hogy a legnagyobb modulációs amplitúdó mellett mekkora a modulációból adódó fázis többlet.

- **Frekvencia moduláció: (Frequency Modulation: FM)**

Frekvencia moduláció esetén a vivő pillanatnyi frekvenciája arányos az $a(t)$ moduláló jellel:

$$\omega_p(t) = \omega_v + K_{FM} a(t) \quad (3.24.)$$

Jellemző adat az un. *frekvencia löket*, ami azt mutatja meg, hogy a legnagyobb modulációs amplitúdó mellett mekkora a modulációból adódó frekvencia többlet.

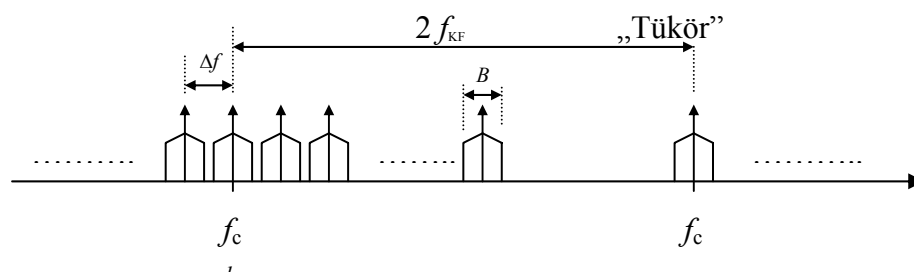
A pillanatnyi fázis a pillanatnyi frekvencia idő szerinti integrálja:

$$\Theta(t) = \omega_v t + K_{FM} \int_0^t a(\tau) d\tau \quad (3.25.)$$

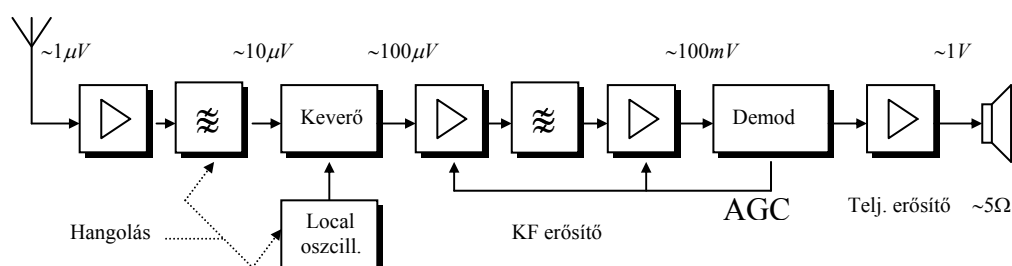
Az FM a jó minőségű URH (sztereó) műsorszórás modulációs eljárása.

3.8. A szuper-heterodin elvű vevőkészülék

A rádiócsatornában az egyes állomások Δf távolságban helyezkednek el. A vevőkészülék szűrőjének már kellő csillapítást kell biztosítania a szomszéd állomás jelére (szelektivitás). Ugyanakkor ezt a szűrőt hangolni is kellene (állomás keresés).



Kellő szelektivitású, hangolható szűrőt készíteni nem tudunk. Ezért a vevőben a szűrési feladatot állandó frekvencia, az u.n. középfrekvencia (KF) környezetében végezzük el oly módon, hogy a venni kívánt állomás jelét a helyi (lokális) oszcillátor jelével a KF sávjába keverjük. A keverő szorzó típusú áramkör.



A bemenő jel f_{cl} környezetében lévő spektruma áthelyeződik a keverő kimenetén az összeg és különbségi frekvenciák tartományába. A helyi oszcillátor f_{osc} frekvenciáját úgy választjuk meg, hogy pld. az $f_{osc} - f_{cl} = f_{KF}$ különbségi frekvencia a középfrekvenciával egyezzen meg. A KF erősítő ezen frekvencia környezetében biztosítja a szelektív erősítést, míg az $f_{osc} + f_{cl} \neq f_{KF}$ összeg frekvencián nincs átvitel.

Az f_{KF} középfrekvencia viszont $f_{c2} + f_{osc} = f_{KF}$ módon is ki tud keveredni, ami azt jelenti, hogy a készülék az f_{c2} frekvenciatartomány környezetét is erősíteni fogja. Az itt elhelyezkedő állomás az u.n. tükör állomás. A bemeneti fokozat hangolható szűrője ennek az állomásnak az elnyomását szolgálja. A bemeneti szűrőnek tehát csak a $2 f_{KF}$ frekvencia-távolságra lévő tüköradóra nézve kell megfelelő elnyomást (csillapítást) biztosítani (és nem a szomszédos állomásra!). Ilyen szűrőt hangolható kivitelben már meg tudunk valósítani.

Ha nagy KF frekvenciát választunk, a bemeneti szűrő feladatát könnyítjük meg, de a KF szűrő megvalósítása lesz nehezebb (kisebb lesz a relatív sáv szélesség, ami a fókuszát határozza meg).

Ennek a dilemmának a feloldására néha kétszeres transzponálást használunk, melynél az első KF a nagyobb, (a tükör állomások távolabb vannak, egyszerű a bemeneti szűrő) a második KF a kisebb frekvenciájú (ahol a szelektivitás a szomszédos adókra nézve könnyebben biztosítható).

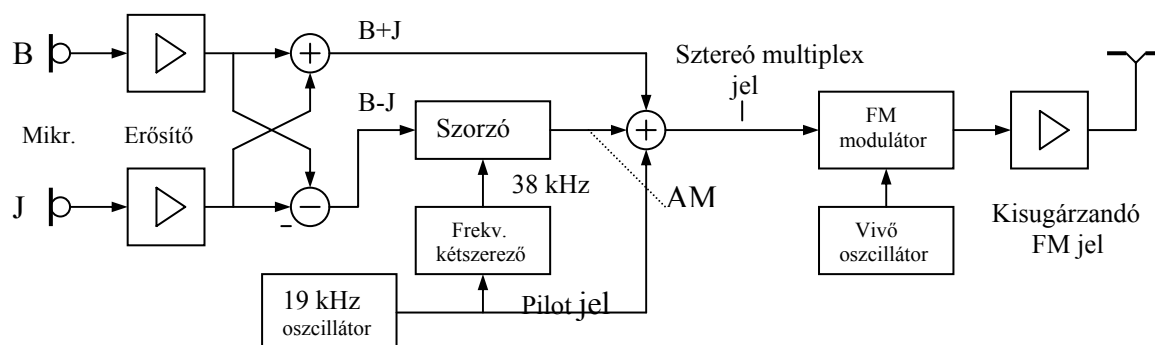
Az automatikus erősítés szabályozás (AGC) biztosítja, hogy különböző térerejű állomások azonos hangerővel szólalnak meg.

Közép- és rövidhullámon a KF frekvencia 455 kHz (AM adások), URH-n a KF 10.7MHz (FM műsorszórás).

3.9. A sztereó műsorszórás

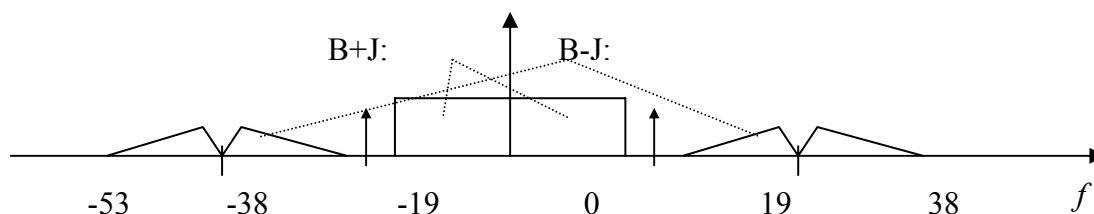
A sztereó műsorszóró adók az URH sávban, frekvenciamodulációs eljárással szolgáltatják programjaikat. Mivel a sztereó műsorok később jelentek meg mint a monó adások, olyan szabványt kellett elfogadni, hogy a monó vevők is tudják venni a sztereó adásokat monó üzemmódban (kompatibilitás).

Ezért, az elvileg független bal és jobb csatorna (B, J) jeleit először is összeadják ($B+J$: ez felel meg a monó adásnak), majd képzik a két csatorna jelének különbségét ($B-J$)-t, amit azután AM-DSB/SC eljárással 38 kHz frekvencia környékére kevernek.



A keverő jelet a 19 kHz –es pilot jel frekvencia kétszerezésével állítják elő. Az alapsávi jel, az AMDSB/SC és a pilot jel összegeként áll elő az un. *sztereó multiplex* jel, ami az FM modulátor bemenő jele. A pilot jelre a vevő oldalon megvalósítandó koherens vétel miatt van szükség.

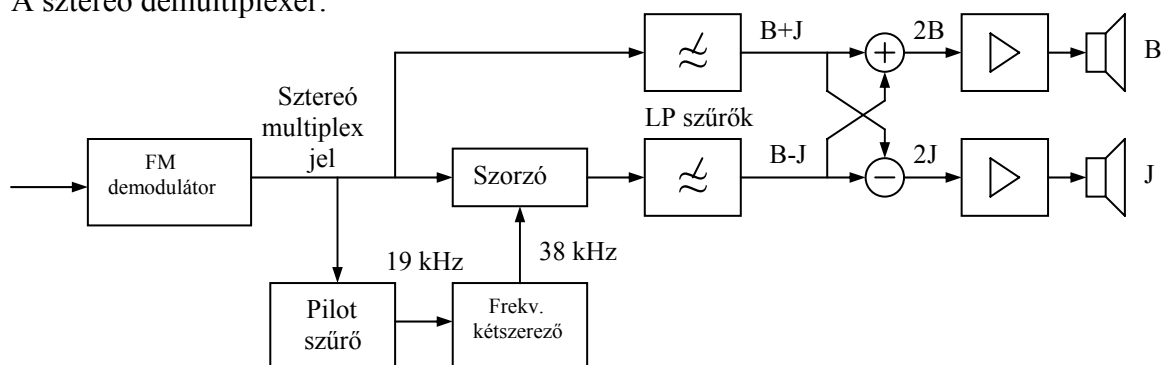
A sztereó multiplex jel spektruma:



A vevőben a KF középfrekvenciás fokozat táplálja jellel az FM demodulátort, melynek kimenő jele a sztereó multiplex jel. Ebből egy keskenysávú sávszűrővel nyerjük ki a pilot jelet és egy 15 kHz határfrekvenciájú aluláteresztő szűrővel a ($B+J$) alapsávi jelet. A pilot jelet egy frekvenciakétszerező fokozatra vezetve, megkapjuk a koherens vételhez szükséges 38 kHz-es keverő jelet. A szorzó kimenő jeléből egy aluláteresztő szűrővel eltávolítjuk a második harmonikus környezetében lévő komponenseket, megkapva ezáltal a

különbségi (B-J) jelet. A (B+J) és a (B-J) ismeretében a mátrix áramkör visszaállítja a bal és a jobb csatorna jelét.

A sztereó demultiplexer:



Ha az adás monó, akkor egy megfelelő automata észleli a pilot jel hiányát és csak az alapsávi (B+J) ágat hagyja bekapcsolva. Ilyenkor mindkét hangszóró ezt a jelet kapja meg.

A sztereó adás főbb jellemzői:

Hangátviteli sáv szélesség:	15 kHz
Maximális frekvencia löket:	75 kHz
Rádiófrekvenciás sáv szélesség:	300 kHz.

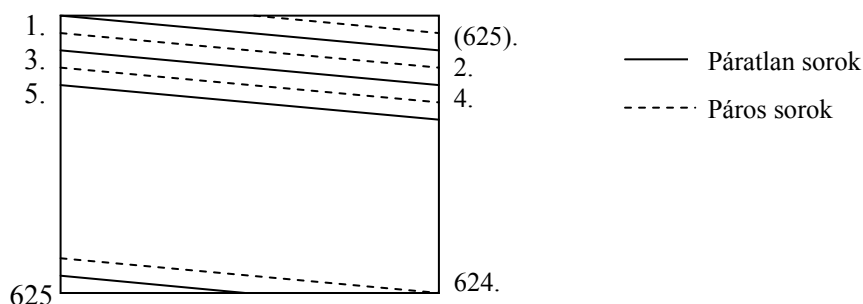
3.10. Az (analóg) TV működési elve

3.10.1. A képfelbontás

A (régí típusú) kamerában az optikai képet először foto-elektromos effektus révén egy elektrosztatikus "kép"-pé konvertálták egy lapka felületén. A jobban megvilágított képpontokban nagyobb, a kevésbé megvilágítottakban kisebb mértékű töltéshiány lépett fel. Ezt a töltéshiányt egy soronként pásztázó elektronsugárral pótolták, miközben mérték annak áramát. Az elektronsugár árama így a képpontok világosságával volt arányos.

A mai, CCD elvű kamerákban az opto-elektromos tulajdonságú felület sorokba és oszlopokba rendezett cellákból áll. A cellákban keletkező töltés (hiány) tartalmát soronként kiléptetve a cellákból, olyan elektromos jelet kapunk, melynek nagysága a kép világosság tartalomtól függ.

Ez az elv nem csak álló, hanem mozgó képekre is érvényes. A téglalap alakú felületet (ami 625 vízszintes sort tartalmaz) másodpercenként 25-ször kell letapogatni annak érdekében, hogy folytonos mozgás benyomása keletkezzék. A visszaállított kép kevésbé fog villódzni, ha a függőleges irányban másodpercenként 50-szer térítjük el az elektronsugarat úgy, hogy a páros sorszámú függőleges eltérítési ütemekben a páros sorszámú sorokat, a páratlan ütemekben pedig a páratlan sorszámú sorokat tapogatjuk le. Ezt az elvet nevezik *váltott soros képfelbontásnak*. (A téglalap arányai: 3:4)



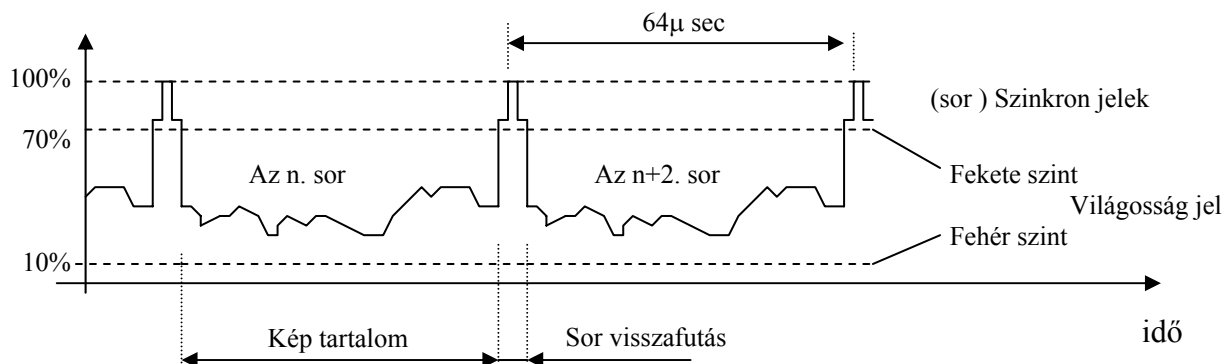
Az elektronsugár vízszintes és függőleges irányú eltérítése az időben lineárisan történik. Függőleges irányban az eltérítés frekvenciája 50 Hz, vízszintes irányban $2 \cdot 25 \cdot 625 = 15625$ Hz. Ebből következően egy fél-kép átvitelének időtartama 20 msec, míg ezen belül egy sor ideje 64 μ sec.

A kép visszaállítása szintén elektronsugárral történik. A vevőkészülék képcsövében lévő elektronágyú áramának intenzitását a képfelbontó jelével arányos jellel vezéreljük. Az elektronsugár a képcső belső felületén elhelyezkedő foszfor rétegbe csapódva, az adott pontban az intenzitással arányos fény felvillanást okoz. A vevőben lévő elektronsugár eltérítését szigorúan *szinkronban* tartva a kamera elektronsugarának eltérítésével, a vevő képernyőjén megjelenik a kamera által közvetített kép.

Az elektronsugár (mind vízszintes, mind függőleges irányú) visszafutása alatt ki kell oltani az elektronsugarat. (A függőleges visszafutás 25 sor ideje alatt történik meg, azért az aktív képsorok száma 600 sor.)

A vevőkészülékek elektronsugarának szinkronizálása érdekében a kamerának nem csak a világosság jelet, hanem *szinkron jeleket* is szolgáltatnia kell. A szinkronizáló impulzusokat a kamera a visszafutás ideje alatt szolgáltatja. A világosság tartalmát úgy képezték le elektromos jellé, hogy a legnagyobb világosságú képponthoz a jel 10%-os szintje, míg a legsötétebb képponthoz a jel 70%-os szintje tartozzon. A 70%-100% közötti tartomány van fenntartva a szinkron jelek számára. A visszafutás ideje alatt (amikor is a szinkron impulzusok megjelennek) az elektronsugár kioltása automatikusan megoldódik.

A fekete-fehér videó jel:



A videó jel sávszélessége:

A képpontok száma: $625 \cdot 833 = 520\,625$ (3:4 téglalap arány)
 Másodpercenként 25 kép : $25 \cdot 520\,625 = 13 \cdot 10^6$ képpont/sec

A képtartalomban a maximális frekvencia: (az egyik képpont fehér, a következő fekete)

$$f_{max} = 13 \cdot 10^6 / 2 = 6,5 \text{ MHz}$$

(A 2-es osztó abból adódik, hogy két pont ad ki egy fekete-fehér periódust). A minimális frekvencia a zérus, (ugyanis ha a kép egytónusú, nincs változás).

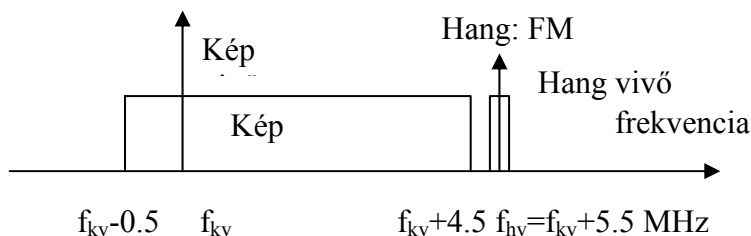
$$f_{min} = 0 \text{ Hz}$$

A TV számára tehát ekkora sávszélességű videojelet (és a hangot) kell átvinni.

3.10.2. A kisugárzott TV jel

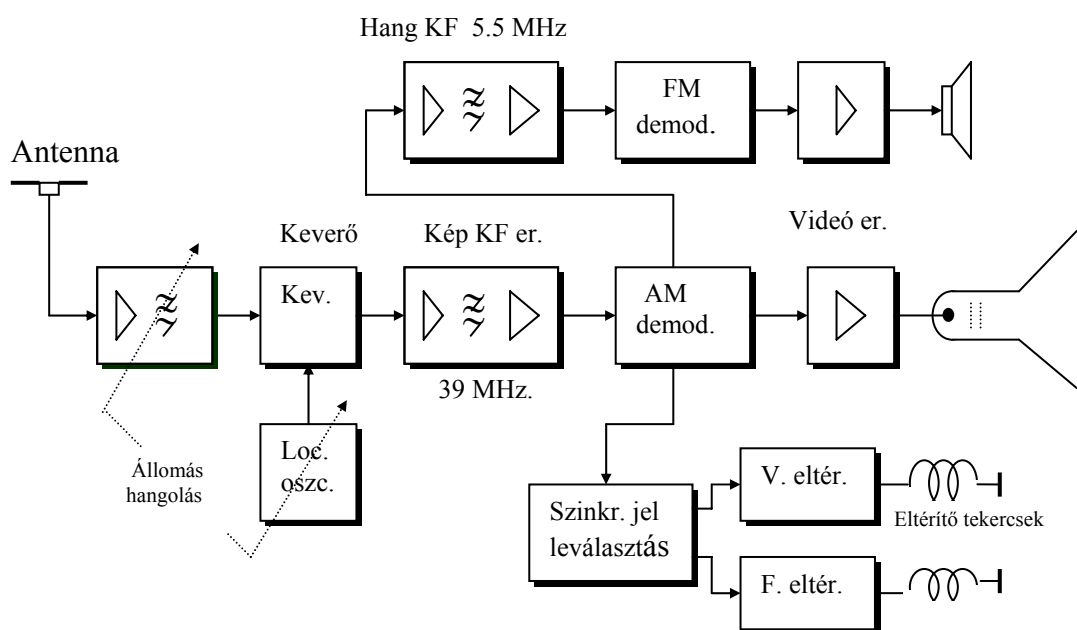
A képjelet csonka oldalsávós amplitúdó modulációval (AM-VSB), a hangjelet frekvencia modulációval viszik át. A csonka oldalsávós AM az AM-DSB modulációnak egy változata, ahol az egyik oldalsávot szűkítve sugározzák ki frekvencia takarékosági okból. A sávszűkítés okozta torzításra a szem nem érzékeny.

A kisugárzott TV jel a frekvenciatartományban:



3.10.3. Fekete-fehér TV vevő felépítése:

A TV vevő felépítése az AM demodulátorig a szuper-heterodin elvet követi. Az AM demodulátor fő feladata az alapsávi videó jel visszaállítása. A világosság jellel erősítés után vezérelhetjük a képső elektronsugarának intenzitását.

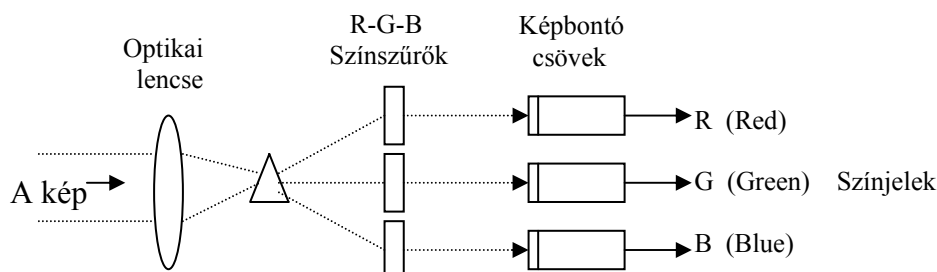


A demodulált jelből amplitúdó határolóval választjuk le a szinkron jeleket, melyekkel az eltérítő fokozatokat vezéreljük. Az elektronsugár eltérítése mágneses térrel történik.

A kép és a hangvivő frekvencia távolsága 5.5 MHz. Az AM demodulátorban kikeveredik e két frekvencia különbsége, ami a hangra nézve egy második KF (közép) frekvencia. A hang KF erősítő után elhelyezkedő FM demodulátor kimenetén áll elő a hang jel. A videó jelben a legvilágosabb képtartalom esetén is a 10%-os jelszintet tartani kell, annak érdekében, hogy az 5.5 MHz-es hang KF jel ne tűnjön el, mert az a hang kimaradását okozná.

3.10.4. Színes képfelbontás és visszaállítás elve

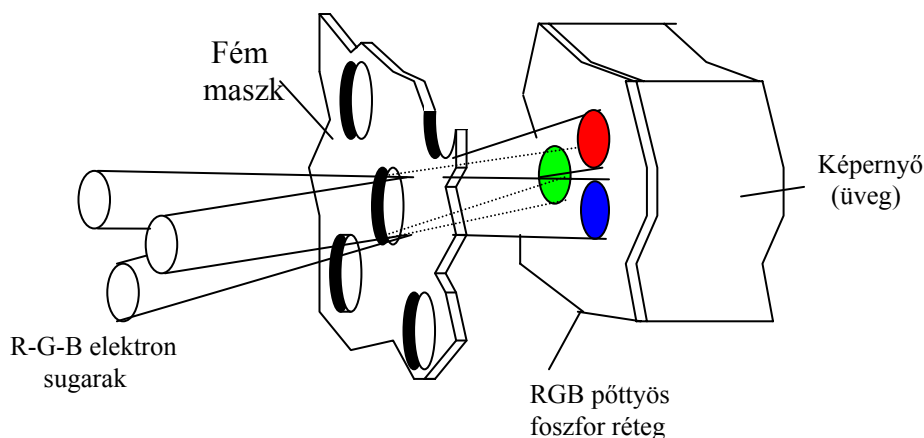
A színes képet színszűrők segítségével három alapszínű, a piros(R), a zöld (G) és a kék (B) összetevőjére bontjuk. A három alapszínű optikai képet ezután három képfelbontó csővel a korábban tárgyalt módon elektromos jellé konvertáljuk.



Az R,G,B jelekkel a három elektronógys képcső megfelelő elektronsugarainak intenzitását vezéreljük. Az elektronsugarak vízszintes és függőleges eltérítése közös. Az elektronsugarak egy perforált fém maszk nyílásán áthaladva érik el a foszfor vegyületekkel bevont képcső előlapját. A foszfor bevonat azonban a színes képcsőben nem homogén, hanem a három alapszínnek megfelelően foltokban helyezkedik el. A foszfor vegyület “pöttyök” úgy helyezkednek el, hogy az egyes elektronsugarak csak a hozzájuk tartozó foltokat érik el.

A színes képpont tehát három különböző színű pontból tevődik össze.

Az emberi látásnak itt azt a tulajdonságát használjuk ki, hogy a három alapszín megfelelő arányának beállításával a színek széles skáláján mozgó színérzetet tudunk kelteni. Ezt az elvet nevezik *additív színkeverésnek*.



Például, ha $R = G = B$, akkor fehér fényt kapunk.

A fekete fehér TV-vel való kompatibilitás miatt azonban nem a három (R,G,B) szín információt viszik át a színes TV rendszerek, hanem a *világosság* jelet (Y) és az *un. színekülönbség* (R-Y, B-Y) jeleket.

A világosság jel:

$$Y = 0.3 R + 0.59 G + 0.11 B \quad (3.33.)$$

Az Y , $R-Y$ és $B-Y$ jelekből a vételi oldalon az R, G, B jelek visszaállíthatók.

A három videojel elvileg háromszoros átviteli sáv szélességet igényelne, ha azokat egyforma minőséggel akarnánk átvinni a rádiócsatornán. Erre azonban nincs szükség, ha kihasználjuk látásunknak azt a tulajdonságát, hogy a szem felbontóképessége a színtartalom tekintetében jóval elmarad a világosság tartalom felbontóképességéhez képest.

Ezért a világosság jelet a fekete-fehér képhez tartozó sáv szélességben, az ott leírtaknak megfelelően vesszük át (kompatibilitás), míg a színkülönbségi jeleket sokkal kisebb sáv szélességgel juttatjuk el a vevőbe.

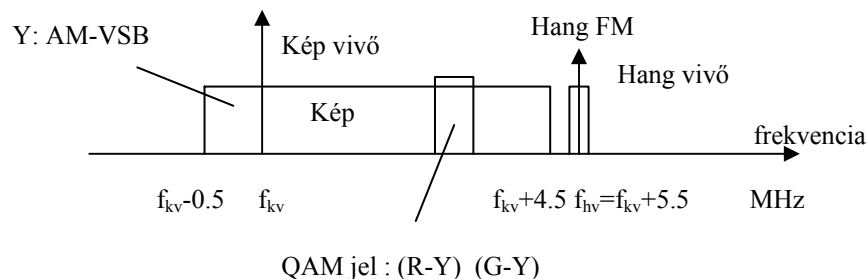
Az $(R-Y)$ és $(B-Y)$ színkülönbségi jeleket a különböző rendszerek különböző modulációval viszik át.

NTSC rendszer: (Amerika, Japán)

Az $(R-Y)$ és $(B-Y)$ kvadratúra amplitúdó modulációval kerül átvitelre.

A vivő frekvencia 3.48 MHz, benne van a videó sávban.

Ez a frekvencia a soreltérítési frekvencia felének páratlan számú többszöröse. Az egymás alatti sorokban ez a jel ellentétes előjellel okoz színtorzulást, amit a szem kiintegrál, így nem okoz látható torzítást.



PAL rendszer: (Európa)

Hasonló az NTSC-hez, de soronként a kvadratúra jelet még invertálják is (ezzel a koherens vétel fázishibája csökkenthető).

SECAM rendszer: (Franciaország)

Soronként az $(R-Y)$ és a $(B-Y)$ színkülönbségi jeleket felváltva viszik át frekvencia modulációval. Az előző sor színkülönbségi jelét eltárolják, és ennek segítségével képzik az alapszíneket. (Függőleges irányban sincs szükség a nagy szín felbontásra).