

Telekommunikáció 2

Dr. Wersényi György

2023 augusztus
Széchenyi István Egyetem
Távközlési Tanszék
jegyzet

1. Bevezetés

A 2017-es tantervreform után a korábbi Telekommunikáció tantárgy kettévált: a Telekommunikáció 1 és 2 tantárgyakra. Míg az előbbi jórészt a vezetékes hírközlésre fókuszál, utóbbi a vezeték nélküli (rádiós) megoldásokra. Ez a klasszikus felosztása a telekommunikációnak már nem állja meg mindig a helyét, hiszen az integrált szolgáltatások, az "infokommunikáció" a legtöbb esetben vegyes infrastruktúrát használ: megtalálhatók a klasszikus vezetékes és rádiós megoldások is egyszerre. Az internet már üvegszálon indul, telefonvonalakat vagy kábeltévé-hálózatokat használ, miközben 4G/LTE vagy 5G mobilneten és WLAN routereken keresztül kerül szétosztásra. Mindezek miatt elterjedtek az olyan kifejezések, mint az infokommunikáció, szélessávú hírközlés és hasonlók. Noha fizikailag a hálózatok jó része még mindig vezetékes, és a rádiós szétosztás az ún. „last mile” során kerül bevetésre, utóbbi fontossága talán még nagyobb is. Az utolsó mérföld valójában legtöbbször néhány tíz vagy száz métert jelent, ugyanakkor ez áll a legközelebb a felhasználóhoz, ezzel találkozik a legtöbbször: bázisállomások, mobiltelefonok és tabletek, WiFi hozzáférések. A tény, hogy vezeték nélkül kell adatátvitelt megvalósítani, ahol az egyik vagy minden végpont mozoghat is, teljesen új technológiákat igényel.

A Távközlési Tanszék korábban két szakirányt, a "rádiórendszerek" és a "távközlésinformatika" specializációt kezelte, ezek olvadtak egybe "infokommunikáció" név alatt. A Telekommunikáció 1-2 tárgy feladata a szakmai alapok elsajátítása volt azzal a céllal, hogy a hallgatók kedvet kapjanak a témához és efelé a szakirány felé orientálódjanak. A szakirányon megkapják az itt elhangzott alapok elmélyítését differenciált tantárgyak (és gyakorlatok) keretében. Ugyanakkor azok a hallgatók, akik más szakirányra mennek, rendelkezni fognak minden BSc-t végző villamosmérnök számára szükséges alapismeretekkel. A távközlés kifejezés kissé elavultnak és kevésbé vonzóan tűnik már a 2020-as években. Pedig ez nincs így, olyan alapszintű közműszolgáltatássá kezd válni, mint a víz, a fűtés vagy az áram. Ehhez mérten szükséges fejleszteni, karbantartani és érteni hozzá. A 2020 tavaszán történt vírushelyzet is rámutatott arra, távoktatás, digitális egészségügy, on-line bevásárlás és csetelés sem lehetséges megbízható, gyors hálózatok nélkül. Szerencsére, a rendszerek jól vizsgáztak, semmiféle fennakadás nem volt, az infrastruktúra bírta a terhelést és még kapacitástartalékok is voltak. Ez azért van így, mert ebben a szakmában jellemzően 5-10 évvel kell előre gondolkodni. Ezt pedig az teszi lehetővé, hogy a szakemberek az alapokat elsajátítva fejlesztik a jelen rendszereit a jövő kihívásait figyelembe véve.

A híradástechnika feladata, hogy elektronikus úton a lehető legjobb minőségben és olcsón információt továbbítson. Alapvető probléma itt az átvitt információ hűsége az átviteli folyamatot zavaró tényezők ellenére. Ez meg is határozza a szolgáltatás minőségét.

Információt lehet szolgáltatni két ember között (pont-pont összeköttetés) vagy egy eszköz és sok ember között (rádióadás, műholdas műsorszórás). Az összeköttetés lehet vezetékes vagy vezeték nélküli, továbbá helyhez kötött vagy mobil, ill. egyirányú vagy kétirányú. A kapcsolat lehet állandó az időben vagy kapcsolt.

A középpontban mindig a felhasználó áll, akit a szolgáltató szolgál ki. Mindkettőjüket a gyártó látja el a megfelelő berendezésekkel, és a folyamatot valamilyen hatóság felügyeli. Manapság a frekvenciagazdálkodás (lásd az 5G tenderek esetét az egész világban), a szabványosítás, a kormányzati cselekvések szoros összefüggésben határozzák meg a távközlés helyzetét. Történelmi távlatban az elektronika és a távközlés története a telegráffal vette kezdetét a XIX. században. Az alábbi felsorolás néhány fontos dátumot jelöl meg a fejlődéstörténetben:

1837 Morse, telegráf

1865 Maxwell, az elektromágneses elmélet, egyenletek

- 1876 Bell, telefon
- 1877 Edison, fonográf (az első „ROM”)
- 1888 Herz kísérletileg előállítja a hullámokat (23 évvel később!)
- 1896 Marconi, drótnélküli távíró
- 1895 Lorenz, az elektronok felfedezése (elektroncső korszak)
- 1897 Braun, az első katódsugárcső
- 1904 Flemming, az első dióda (nemlináris eszköz)
- 1920 rádiótávközlés
- 1940 televízió, radar
- 1948 Bell labor, bipoláris eszköz: germánium-tűs tranzisztor
- 1950 Shannon-tétel, ADC-DAC
- 1954 szilícium tranzisztor
- 1958 az első integrált áramkör, és a JFET
- 1960 SSI (<100 elem), és a MOSFET
- 1962 Távközlési műholdak
- 1971 Mikroprocesszor
- 1977 Fénykábel
- 1979 Az első LAN, Ethernet
- 1983 Mobiltelefonok megjelenése, Magyarországon 1990 után
- 1997 Az első DVB-T adás (Anglia)
- 1998 HDTV (USA)
- 1999 A Vodafone 3. szolgáltatóként elindul hazánkban
- 2007 Az első érintőképernyős iPhone, majd az Android
- 2009 4G
- 2011 DVB-T2 szabvány
- 2014 Teljes képernyős, billentyűzetmentes okostelefonok

A *hírközlés* feladata a jelek leírása, megragadás és továbbítása. Ennek során valamely, az ember számára feldolgozható kép és hangélményt kell átalakítanunk elektromos jellé, azt rögzíteni ill. továbbítani, végül a vevő helyén ismét visszaalakítani. A közvetítő közeg lehet a csatorna (amelynek jellemzője, hogy zajt ad az átvitelhez) ill. valamilyen rögzítő berendezés. Jegyezzük meg, hogy a rögzítők esetén is van hozzáadott zaj, ez azonban lényegesen kisebb (és másfajta), mint csatorna esetén. A csatorna, ahogy láttuk fent, lehet vezetékes vagy vezetéknélküli, ill. ezek kombinációja.



A hírközlés blokkdiagramja.

Ez a megközelítés független attól, hogy az átvitel analóg vagy digitális. Amennyiben adatokról is szó van, és manapság vizsgáljuk a rendszereket, digitális változatról beszélünk. Kezdetben, az analóg világban a cél a hang és kép átvitele ill. rögzítése volt.

A tantárgy célja, hogy ezen a blokkdiagramon végighaladva tárgyalja a hang és a képinformáció tulajdonságait (miféle jelek ezek), milyen átalakítók szükségesek az adó és a vevő oldalon, valamint mit lehet és kell tenni a csatornát figyelembe véve az átvitel sikerének érdekében.

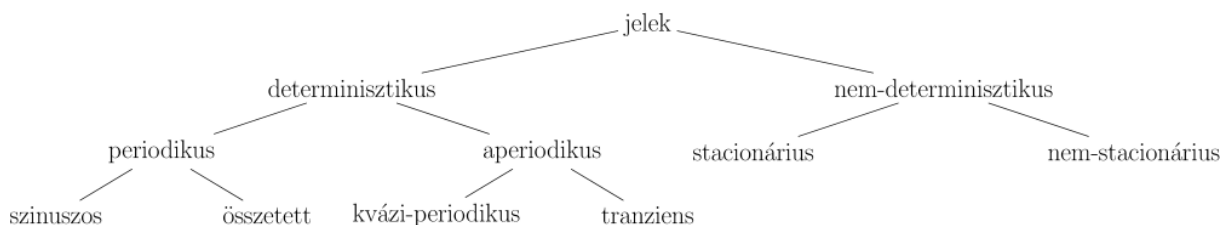
2. A jelek leírása és osztályozása

A jel a fenti ábrát követve a hír elektromos megfelelője. A jel számunkra általában az idő vagy a frekvencia függvénye, néha pedig a térkoordináták függvénye is. A leggyakoribb esetben *skalár* értékűek, és az egyetlen független változójuk az idő. Tágabb értelemben a jelek lehetnek komplex értékűek (vektorértékű) vagy többváltozósak is.

Az átalakítók feladata, hogy az érzékelésre szánt jelet elektromossá alakítsák, ill. később azt ismét észlelhető ingerré formálják. Ilyen átalakító a mikrofon és a kamera, ill. a vevő oldalán a katódsugárcső (tévékészülék) vagy a hangszóró. A jel továbbítása a zajos csatornán a hírközlés központi problémája! A továbbiakban a jelek leírásával, megragadásával foglalkozunk analóg és digitális esetben is.

A jelek legfontosabb osztályozása az értékészlet és értelmezési tartomány alapján történik. Ha mindkét „irányban”, azaz az x és az y -tengely mentén is folytonos a függvény, *analóg* jelről beszélünk. Ha mindkét irányban diszkrét, akkor *digitális* jelnek nevezzük. Ennek részletesebb tárgyalása később kerül elő (analóg-digitál átalakítás). Számítógéppel csak digitális jeleket tudunk feldolgozni. Létezik természetesen a kettő közötti állapot is, amikor a jel csak időben diszkrét (ezt mintavételezett jelnek hívjuk), ill. ha csak amplitúdóban diszkrét (melyet kvantált jelnek nevezünk).

Egy másik fontos osztályozási szempont alapján a jelek lehetnek *determinisztikusak* vagy *nem determinisztikusak*. Utóbbiakat nevezzük *sztochasztikusnak*. Ezek nem periodikus rezgések. A determinisztikus (jelentése: jól meghatározott, determinált) jel egyértelműen leírható időfüggvényével (vagy spektrumával), és az alapján a rá jellemző tulajdonságok meghatározhatók. Ha pl. megadjuk egy oszcillátor frekvenciáját és amplitúdóját, akkor mindent tudunk róla.



A jelek osztályozása.

A hírközlésben nagyon sok olyan jel van, amelyet nem szerencsés ilyen módon megadni. Például, ha beszédátviteli paramétereket akarunk vizsgálni, nem elég egyetlen beszélő által megformázott 'a' hangzó tulajdonságait vizsgálunk. Ugyanaz a beszélő sem képes kétszer pontosan ugyanazt az időfüggvényt produkálni egy hang kiejtésénél. Továbbá, egy beszédátviteli rendszer (mikrofon, hangszóró) nem csak ezt az egy hangot és beszélőt, hanem az összes beszélő összes hangját kell, hogy megfelelő módon átvigye. Célszerűnek látszik tehát, ha a beszédet, mint *függvénysereget* értelmezzük. Ez – elvileg – végtelen sok függvényből is állhat, amelyeknek közös tulajdonságaik vannak. Ez a fajta kezelés közel áll a valószínűségi számítás fogalmaihoz, hiszen egy adott kiejtett hang és annak időfüggvénye (műszaki nyelven: realizációja) valószínűségi változó, amelyek bekövetkezése sem állandó gyakoriságú (sokkal gyakoribb az 'e' hang a magyarban, mint az 'ü'). Az ilyen sztochasztikus jeleket statisztikus jellemzőkkel írhatunk le (átlagérték, teljesítmény, várható érték stb.). Ilyen esetben egyetlen realizációból nem feltétlen vonhatunk le végleges következtetéseket. A

determinisztikus jeleknél azonban igen, ilyenkor egyetlen képlettel megadható „minden”. A determinisztikus jel egyetlen konkrét függvény.

2.1 Determinisztikus jelek néhány jellemzője

A determinisztikus jel lehet

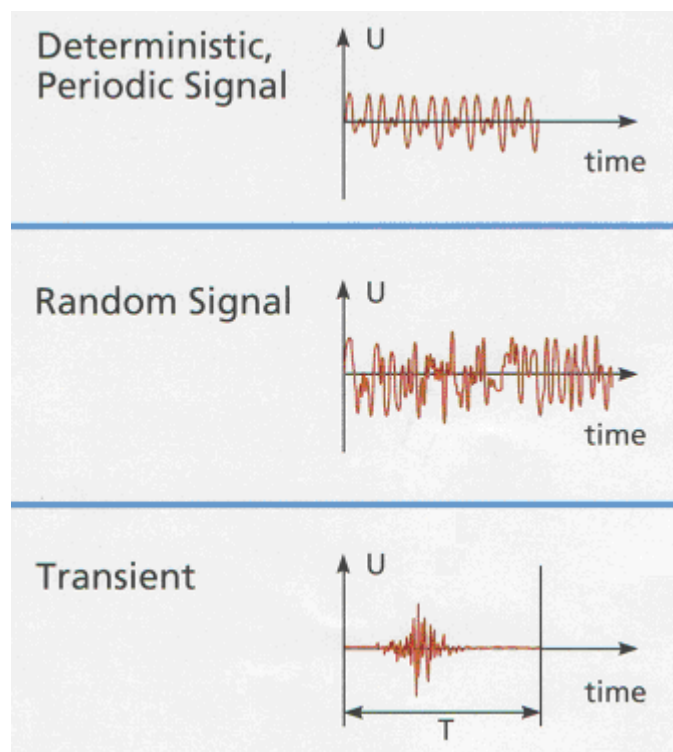
- véges idejű, ha létezik olyan időpont, ami előtt és/vagy után értéke zérus. Magyarán, ha a jel nem végtelen ideig tart, hanem van kezdete és/vagy vége (ki/bekapcsolási jelenségek). Ezeket a jeleket könnyebb matematikailag is kezelni, mert a számításokat nem kell $-\infty$ és ∞ között végezni, adott esetben az integrál egyszerűsödik.

- korlátos a jel, ha amplitúdója (értékkészlete) véges, bármely időpillanatban egy $K < \infty$ érték alatt marad.

- periodikus a jel, ha adott T periódusidő után ismétlődik. A számítások ekkor is egyszerűsödnek, hiszen azokat elég egy periódusidőre elvégezni.

- harmonikus a jel, ha szinuszos, azaz időfüggvénye az alábbi alakú: $y(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$, ahol ω a körfrekvencia, φ a kezdőfázis.

A legfontosabb jeleink vagy impulzusszerűek (rövid ideig tartanak), vagy tartósan fennállók, hosszú ideig tartanak.



Determinisztikus periodikus jel, véletlen (zaj) jel és tranziens (impulzus) jel időtartománybeli képe.

2.2 A spektrális leírás

A determinisztikus jelek egyértelműen leírhatók és megadhatók a spektrális leírással, azaz a Fourier-transzformálttal. Valós függvény (márpedig leggyakrabban időfüggvényről van szó, az idő pedig mindig valós) transzformáltja komplex, ami áll az amplitúdó- és a fázisspektrumból.

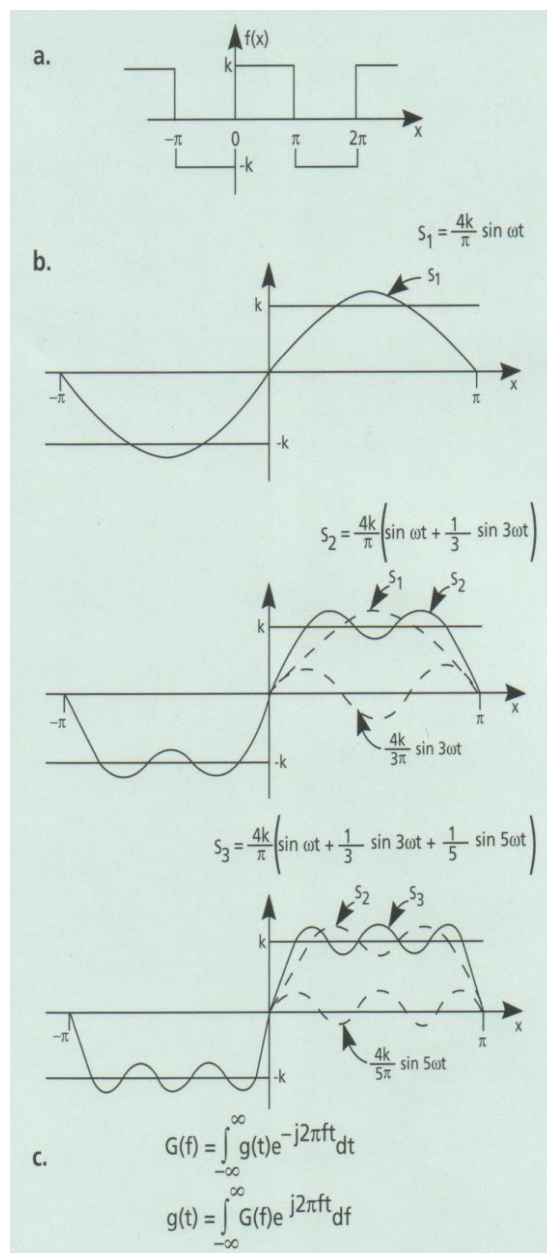
A Fourier-tétel mondja ki, hogy végtelen harmonikus jel összegeként előállítható bármely determinisztikus folyamat. Az időtartományi és a frekvenciatartományi leírás teljesen egyenértékű és kölcsönösen egymásba átszámítható!

A Fourier-transzformáció:

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

illetve visszafelé:

$$a(t) = \int_{-\infty}^{\infty} A(f) e^{j2\pi ft} df$$



Fourier-sorfejtés. Egy periodikus jel (a) leírható szinuszos és koszinuszos függvények végtelen összegeként. Ennek a folyamatnak az első három elemét mutatja a (b) ábra, miként közelít a sorfejtés az eredeti négyesszögjelhez. Folytonos és nem periodikus jeleknél az összegzés helyett integrálás szerepel (c).

A leggyakrabban használt átlagos jelparaméter az effektív érték (angolul root mean square, RMS). Fizikai tartalma, hogy egy nem DC jelet egy DC jelhez viszonyítunk annak energiataralma alapján.

$$A_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt}$$

A legegyszerűbb szinuszos esetben az effektív érték a csúcserék gyököttes része. Szemléletesen úgy mondhatjuk, hogy egy 115 V effektív értékű AC forrás ugyanakkora teljesítményt ad le egy adott ellenálláson, mint egy 115 Voltos DC. Ekkor az AC forrás csúcseréke $115 \cdot \sqrt{2}$ V. Jelen esetben az effektív feszültség frekvenciafüggetlen.

Determinisztikus rezgések viszonylag egyszerű matematikával kezelhetők. Több jel összegzése, szuperponálása azonban meglehetősen bonyolult jelfolyamatokat is eredményezhet. Az alábbi példa szemlélteti, miként lehet azonos frekvenciájú, de különböző fázisú rezgéseket fázishelyesen összegezni.

Példa:

$$y_1(t) = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$$

$$y_2(t) = A_2 \sin(\omega t + \varphi_2)$$

Az összegjel is szinuszos jel lesz, azonos frekvenciával, de az amplitúdó és az eredő fázis más lesz:

$$y_{eredő}(t) = y_1(t) + y_2(t) = A_{eredő} \sin(\omega t + \varphi_{eredő}), \text{ ahol}$$

$$A_{eredő}^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \text{ és}$$

$$\tan(\varphi_{eredő}) = (A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2) / (A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2)$$

A fázishelyes összegzésből adódik, hogy az kioltást és erősítést is eredményezhet. Több tag esetén az eredmény még bonyolultabb.

A periodikus rezgések spektruma vonalas, a nem periodikusaké folytonos: egymáshoz végtelen közel eső végtelen számú spektrumvonalból áll. A periodikus rezgések vonalainak számát, méretét a Fourier-együtthatók adják meg, míg a folytonos spektrumot a Fourier-integrállal számíthatjuk ki (általában számítógéppel, numerikus módszerekkel).

2.3 Sztochasztikus jelek leírása

Sztochasztikus folyamatokat bonyolultabb leírni és megragadni. Talán meglepő, de egy olyan függvény, amelynek egyik eleme valószínűségi változó is leírható a frekvenciatartományban. Például, ha egy oszcillátort bekapcsolunk, amelynek amplitúdója és frekvenciája adott, a véletlentől függ csak, milyen kezdőfázissal indul (ez feltehetőleg lényegtelen az alkalmazás szempontjából). Matematikailag az egyenlet hasonló a harmonikus determinisztikus leíráshoz:

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$$

ahol φ ebben az esetben egy valószínűségi változó a $[0-2\pi]$ tartományban. Egy adott bekapcsolás azonban egy adott realizációt fog létrehozni, pl. $\varphi = 225$ fok. Érezhető, hogy bár az összes függvény más és más lesz, mégis lesz az egész folyamatnak közös tulajdonsága. Ebben

a példában az egyes realizációk azonos valószínűségűek, mert az eloszlás egyenletes. Ez azonban nem mindig van így, semmi sem garantálja, hogy a valószínűségi változó egyenletes legyen (lásd a példa az 'e' hangzóval). Ha pedig az eloszlás nem egyenletes, akkor egyes realizációk, a gyakoribbak, sokkal „jellegzetesebbek” lesznek az adott folyamatra, mint mások, a ritkán előfordulók.

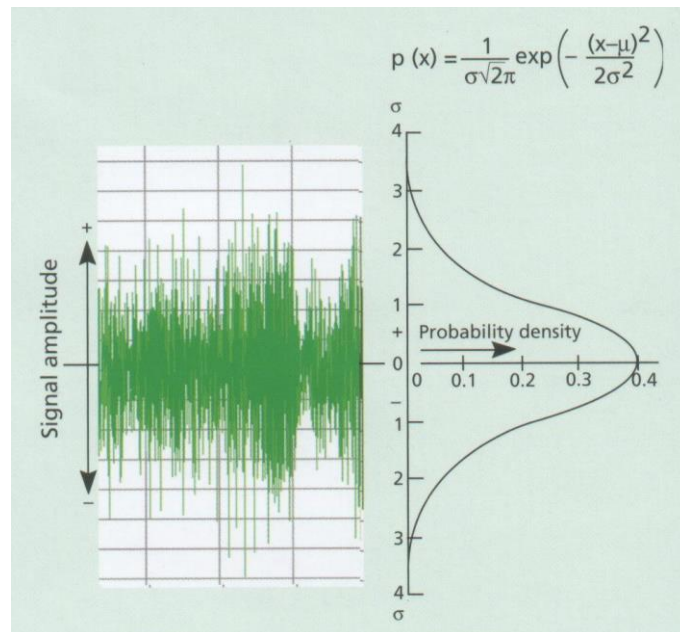
A példán is látszik, hogy a függvény argumentumában lévő valószínűségi változó okán, maga a függvény értéke is szükségképpen valószínűségi változóvá válik. Ha ismerjük φ eloszlását (sűrűségfüggvényét), ez alapján az $x(t)$ eloszlást is megadhatjuk. (Emlékezzünk rá, hogy az eloszlásfüggvény deriváltja a sűrűségfüggvény.) Egy ilyen függvény alapján megmondhatjuk, hogy jelünk milyen valószínűséggel (milyen gyakran) lép ki egy adott amplitúdótartományból, amellyel egy hozzá kapcsolt erősítőt torzításba vezérelne.

Hasonlóan, jellemző paraméter lehet egy ilyen függvénysereg és $x(t)$ értékek várhatóértéke ill. a teljesítmény várható értéke.

Stacionáriusnak (stacionernek) nevezzük a folyamatot, ha a fentiekben megadott eloszlásfüggvényei az időeltolásra érzéketlenek, magyarul időinvariánsak. Ez gyakori eset, és a számításokat egyszerűsíti. Más szóval, stacioner folyamat realizációjából tetszőleges időben választhatunk ki adott T-időintervallumot, amelyben a statisztikus paramétereit meghatározzuk. Nem determinisztikus jelek spektruma folytonos. A sztochasztikus jel fázisa, és így fázisspektruma is statisztikusan ingadozik, utóbbi megadása ezért nem lényeges. Sztochasztikus folyamatoknak is létezik azonban spektrális leírása, amelyet spektrális sűrűségfüggvénynek nevezünk. Ez az időfüggvény Fourier-transzformáltjának négyzete, dimenziója V^2/Hz . Ha a valóságban végzünk analízist, véges sáv szélességű jellel dolgozunk (szűrjük). Az ilyen elemzés általában a teljesítményspektrumot adja, így ahhoz, hogy a teljesítménysűrűség-spektrumot megkapjuk, el kell ezt osztani az analízis sáv szélességével (ezzel egyben függetlenítjük is tőle). A sztochasztikus jelek ilyenformán meghatározott jellemzői mindig közelítő, becsült értékek. Ezért gyakran sok mérés utáni átlagszámításból nyerjük az információt.

Nem csak a beszéd jó példa sztochasztikus jelre, hanem a zajok is. A zajt általában a híradástechnikában nem kívánatos jelenségnek tekintjük, így ennek megragadása, teljesítményének kiszámítása döntő jelentőségű. De nem csupán haszontalan zajokkal találkozunk, mert speciális mérőjelnek különböző eloszlású zajokat használhatunk. A legegyszerűbb és legismertebb a fehérzaj, melynek amplitúdóspektruma egyenletes (egy vízszintes vonal). Célja, hogy az őt alkotó végtelen sok harmonikus hullám azonos erősséggel (amplitúdóval) vegyen részt a felépítésben, így egy adott átviteli rendszeren átbocsátva, a teljes frekvenciatartományt azonos érzékenységgel (jel-zaj-viszonnyal) tapogatja le. Ezért a fehérzaj az egyik legjobb módszer az átviteli függvény mérésére, mert közvetlenül adja meg azt. Az ilyen zajtípus időfüggvény-realizációi szinte semmit sem mondanak el a folyamatról. Megjegyezzük, hogy van sok más fajta zaj is, pld. rózsaszín vagy Gauss-eloszlású.

A nemstacionárius jelek matematikai kezelése nagyon bonyolult. Többségük azonban korlátozott időtartományban közel stacionárius jellegűek, és itt kezelhetők e módon. Az ilyen jeleket kvázistacionernek hívjuk. Igazából a beszéd is ilyen folyamat.



Normál (Gauss) eloszlású zaj sűrűség függvénye és annak képlete

2.4 A logaritmus

Bizonyos mennyiségek nem csak lineáris tengely, hanem logaritmikus lépték mellett is használatosak. Ennek oka kettős: egyrészt az ábrázolni, leírni kívánt mennyiség tartománya túl nagy; másrészt a szorzás művelete a logaritmizálás után összeadássá egyszerűsödik.

Logaritmikusan mindkét tengely mentén dolgozhatunk. A frekvenciatengelyt gyakran osztjuk fel oktávokra vagy dekádokra a nagy átfogás érdekében. Hasonlóan, az amplitúdót is gyakran logaritmizálva ábrázoljuk a nagy dinamika miatt, vagy mert egyszerűen az erősítéseket inkább összeadni szeretnénk a szorzás helyett. Ilyenkor dB-ben adjuk meg a mennyiségeket, jelszinteket.

Például a hangnyomásnak és az intenzitásnak is létezik dB-ben megadott szintje. Nagyon kell ügyelni arra, hogy ezeket ne keverjük össze se egymással, se a skalár mennyiségekkel. Az intenzitásszint:

$$I = 10\log(I / I_0) \quad [\text{dB}]$$

, ahol, $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$. Látható, hogy az intenzitás teljesítmény jellegű mennyiség, azaz a logaritmus előtti szorzó tíz. Az összes többi decibel, amit használunk, feszültségdecibel, azaz húszas a szorzó. A hangnyomásszint:

$$P = 20\log(P/p_0) \quad [\text{dB}]$$

, ahol $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$. Figyeljük meg jól, hogy a szinteket mindig nagybetűvel jelöljük (I, P), a többit pedig hol naggyal, hol kicsivel.

Érdekességként említjük meg, hogy hangnyomásszintek összeadása a hallás logaritmikus tulajdonsága miatt igencsak furcsa matematikát követ: két azonos hangnyomásszintű forrás együttese +3 dB növekedést jelent, tehát $10+10 \text{ dB} = 13 \text{ dB}$, de $100+100 \text{ dB} = 103 \text{ dB}$.

Példa:

Három feszültség erősítőt kapcsolunk egymás után, az első tízszeresére, a második nyolcszorosára, a harmadik kétszeresére erősíti a bementére jutó feszültséget.

$$x10 = +20\text{dB}$$

$$x8 = +18\text{dB}$$

$$x2 = +6\text{dB}$$

$$x160 = +44\text{dB}$$

Az alábbi értékeket célszerű megjegyezni:

+1dB erősítés 12% feszültség és 25% teljesítménykülönbséget jelent

+3dB a kétszeres teljesítményhez tartozik

+6dB a kétszeres feszültséget, azaz a négyszeres teljesítményt jelenti.

2.5 Linearitás

Ha lineáris az átviteli út, akkor nincs torzítás a rendszerben és az átvitt jel formája, időbeni lefutása csak egy konstansban térhet el az eredeti bemenő jeltől. Mivel a terjedési idő nem végtelen, az időbeni késés is megengedett. Ha ez egynél nagyobb, erősítőről beszélünk, ha kisebb, csillapítóról. Más szóval, olyan frekvenciájú jel nem jöhet ki belőle, ami nem ment be. Nem lineáris átvitelnél új komponensek is megjelennek, amik az eredeti jelben nem voltak benne. Ilyenkor az átviteli utat leíró átvitel függvényben bizonyosan találhatóak hatványozó tagok, négyzetre emelők, köbök stb. A lineáris átvitel tehát új frekvenciájú komponenseket nem hoz létre, pusztán a konstanssal való szorzást és esetleg időkésltetést okozhat, melyeket nem is tekintünk hibának, hiszen könnyedén korrigálhatók.

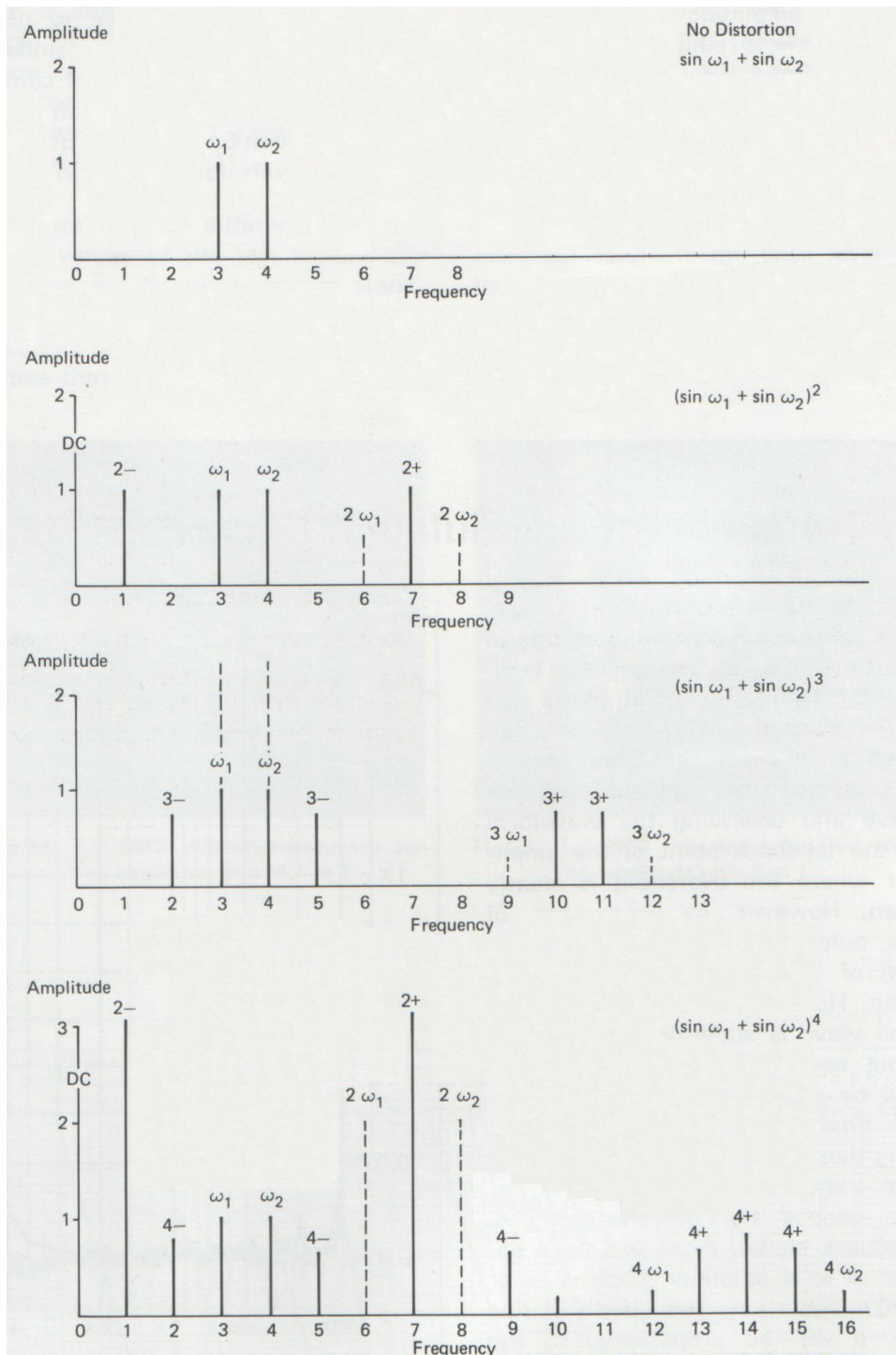
Példa.

Legyen a rezgés $y(t) = A\sin(\omega t)$ alakú, az átviteli út leírása pedig $y_2 = Ay^2 + By$. Azaz, az átviteli út a bejövő $y(t)$ jelet négyzetre emeli és megszorozza az A-konstanssal, majd hozzáadja annak B-szeresét is. A lineáris átviteli úton, csak a By-szorzat megengedett. Ezek után:

$$y_2 = Ay^2 + By = A(a \sin(\omega t))^2 + B(a \sin(\omega t)) = (Aa^2) \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} + Ba \sin(\omega t)$$

Jól látható, hogy a $\sin(\omega t)$ négyzete miatt megjelent egy kétszeres frekvenciájú koszinuszos tényező, ez az alaphfrekvenciának egész számú többszöröse, azaz *harmonikus torzítás*. A harmonikus torzítás tehát nem lineáris torzítás, és elég gyakori jelenség. Minél magasabb rendű a hatvány, annál több és újabb komponensek jelennek meg.

Ezt a folyamatot számszerűsíteni is tudjuk, ha megadjuk az összes különböző frekvenciájú torzítási komponens összes teljesítményét, osztva az alaphang teljesítményével. Százalékos értékben vagy dB-ben kifejezve, ez a mutató a teljes harmonikus torzítás, angolul a Total Harmonic Distortion (THD).



Harmonikus torzítás különböző átviteli függvények esetén. Fenn: lineáris átvitel, alatta különböző hatványozó átvitelek. Minél nagyobb a hatvány, annál több torzítási komponens jelenik meg.

A linearitásról tehát az *átviteli függvény* ad számot. Ez néha adott analitikusan (függvénnyel leírva), néha pedig a mi feladatunk megmérni. A mérésnek sok módja van, ezek közül a legismertebb az impulzusválasz használata. Az impulzusválasz egy időfüggvény, amit a rendszer ad ki a kimenetén, miután a bemenetére egy impulzustadtunk. Az ideális impulzus a dirac-delta, mely végtelen rövid ideig tart, ugyanakkor végtelen „magas”, egységnyi intenzitású. Ez természetesen a gyakorlatban nem realizálható. Lineáris, invariáns rendszer $ki(t)$ kimeneti válasza a $be(t)$ bemenő jel és az $i(t)$ impulzusválaszának ismeretében a konvolúció műveletével az alábbi konvolúciós integrállal számítható ki:

$$ki(t) = \int_{-\infty}^{\infty} i(t - \tau)be(\tau)d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} i(\tau)be(t - \tau)d\tau$$

A konvolúciós integrál számítási nehézsége miatt ennél egyszerűbb módszert is alkalmazhatunk a kimeneti jel megállapítására. Ehhez majd a Fourier-transzformációt hívjuk segítségül, ahol a fenti művelet egyszerű szorzássá változik. Ennek részletes tárgyalása a villamosságtan, jelek és rendszerek témakörébe tartozik.

Az impulzusválasz Fourier-transzformálja a *súlyfüggvény*, vagyis maga az átviteli függvény. A mérés tehát abból áll, hogy a bementre egy rövid impulzust adunk, és a kimeneti jelet transzformáljuk. Előnye, hogy gyorsan zajlik a folyamat, hátránya, hogy a jel-zaj-viszony alacsony. Ne feledjük, hogy az impulzus spektruma egy végtelen hosszú egyenes spektrum. Szemléletesen úgy tekinthetjük, mintha a dirac-impulzusunkat „elfeketetnénk” a frekvenciatengely mentén: a nulla ideig tartó magas impulzus egy végtelen hosszú spektrummal rendelkezik, amelyben minden összetevő azonos súlyú (a dirac impulzus spektruma 1). Ebből is látható, hogy bár a nem ideális impulzus sáv szélessége nagy és egyenletes, az energiaeloszlása is az, így a jel-zaj-viszony alacsony lesz. Viszont nincs szükség transzformációra, a mérés a frekvenciatartományban zajlik.

A másik módszer, a már korábban megismert fehérzaj alkalmazása. Ezt is széles spektrumú, ugyanakkor energiája nagyobb és ezáltal a mérés jel-zaj-viszonya is. Cserébe azt az árat fizetjük, hogy a mérés tovább fog tartani.

A legideálisabb módszer a jel-zaj-viszony szempontjából a szinuszos gerjesztés. Egyetlen szinuszos jel az időtartományban végtelen hosszú ideig tart és maximális energiájú, ugyanakkor spektruma végtelenül keskeny: egyetlen vonal. Egyetlen szinuszos jellel (tipikusan 1 kHz) az átviteli függvény egyetlen pontját tudjuk meghatározni. Ahhoz, hogy a teljes függvény megkapjuk, minden frekvenciát meg kell mérni. Ez pedig végtelen ideig tartana. Ehelyett gyakran alkalmazzák az ún. sweep-jelet, mely végigpásztazza az egész frekvenciatartományt rövid ideig tartó szinuszjelekkel.

2.6 Mintavétel és kvantálás

A digitális technika és rögzítés célja a *reprodukálhatóság*. Más szóval, a minőség konzerválása: amit egyszer felvettünk, az úgy is marad. Erre garancia a hibajavítás és maga az elv, az hogy 0 és 1 biteket kell dekódolnunk. Ezt pedig akár nagyon zajos környezetben is megtehetjük! Gondoljuk el, hogy egy zajos csatornában analóg jelet sugárzunk, amit egzaktul kéne vennünk: ha a zaj befolyásolja, torzítja a jelet, a vétel minősége romlik. Ugyanebben a csatornában a digitális jelek, amelyek valójában ugyanolyan elektromos feszültségértékek, teljesen hibátlanul dekódolhatók egész addig, amíg a dekóder felismeri az 1 és 0 biteket. Akármennyire is eltorzulhat egy ideális 101010... négyesjoggal, amíg a dekóder ezt képes visszanyerni, az átvitel tökéletes.

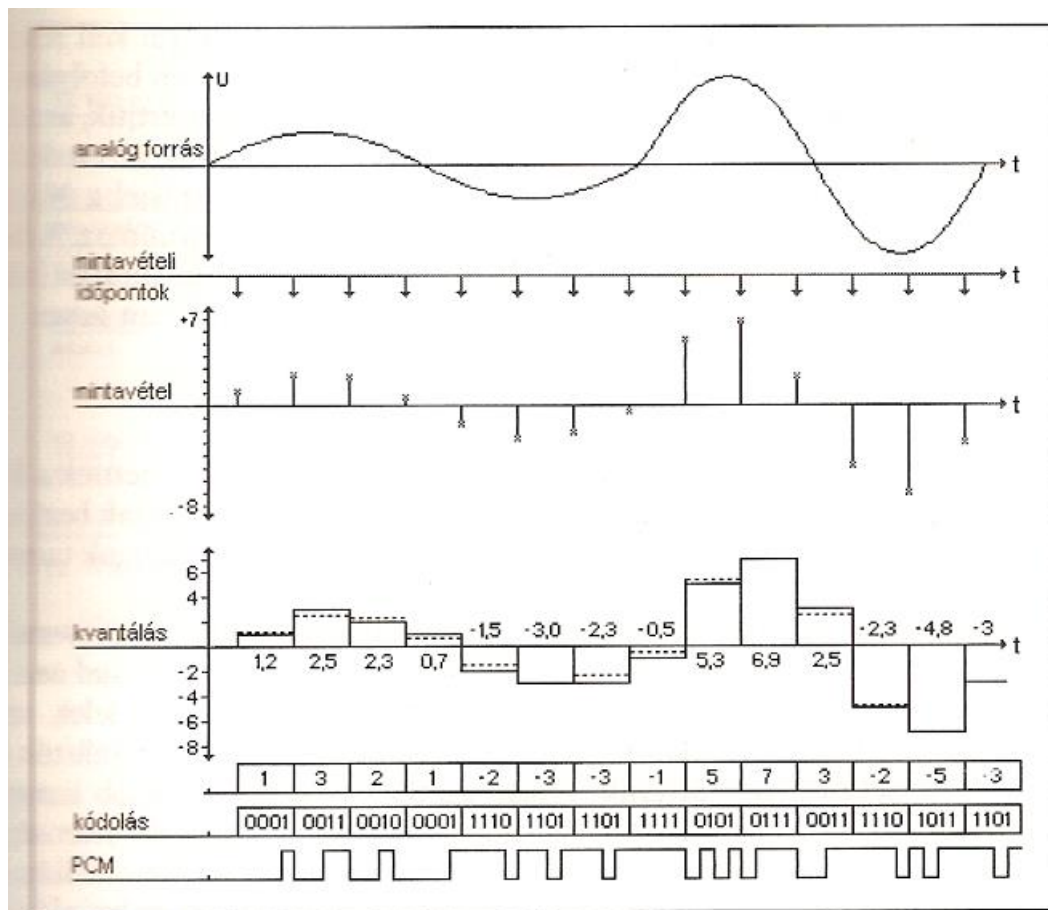
Ugyanez vonatkozik a másolásra is: analóg anyagot másolva a minőség folyamatosan romlik. Ilyenkor beszéltünk Master és Copy szalagról, ez mára már Original és Clone névre hallgat...persze, ez sok jogi kérdést is felvet, hiszen korlátlan a digitális másolás lehetősége.

Mi tehát a digitális jel? Két dolognak kell megfelelnie, amit az analóg-digitál (A/D) átalakítók végeznek:

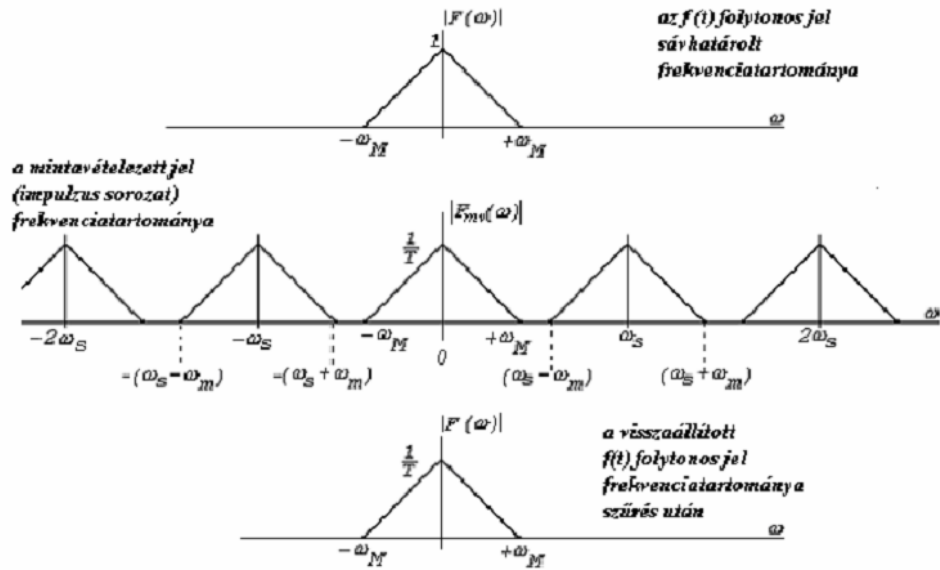
1. mintavétel (sampling): a mintavétel során az analóg jelből mintát veszünk adott időközönként. Így **időben diszkrét** mintasorozatot kapunk, amely számsorozat (még) végtelen

sok tizedestörtből áll. A Shannon-féle mintavételi törvény szerint, ha f_{mv} (mintavételi frekvencia) $> 2B$ (ahol B a jel sávszélessége), akkor ezek az időminták leírják a jelet a közbenső időszakokban is tökéletesen, és a visszaállításhoz egy ideális aluláteresztő szűrő szükséges (interpoláló szűrő). A jel visszaállítás (D/A) hibátlan és tökéletes! Ez azonban csak elméleti lehetőség, hiszen a számértékek még végtelen sok bittel írhatók csak le. Ahhoz, hogy rögzíthessünk, ezeket az értékeket kerekíteni kell.

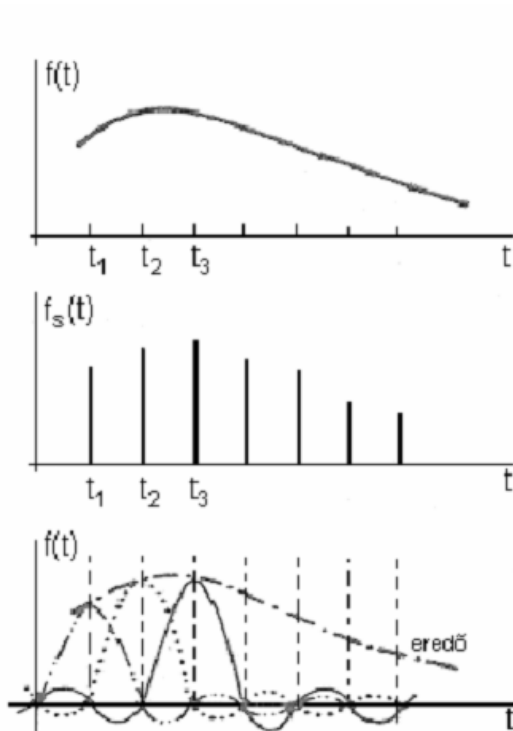
2. a kvantálás során a fenti értékeket most a másik tengely mentén diszkrétizáljuk. Az egész dinamikartományt felosztjuk apró lépcsőkre (kvantálási lépcső), méghozzá minél többre. Egy 8 bites kvantálás során minden „kódszó”, azaz minden lehetséges lépcsőfoknak egy 8 bites szót feleltetünk meg, ez összesen 2^8 darab lépcső. Ha még egy bitet hozzáadunk, akkor ez a lépcsőszám duplázódik, azaz a felbontás finomodik. A CD-hez 16 bites felbontást használunk. Ezután tehát a már időben diszkrét minták **amplitúdóban is diszkrété** válnak. A finom részletek, kis változások (amelyek kisebbek, mint két lépcső közötti távolság fele) véglegesen elvesznek, tehát veszteséget, vissza nem állítható hibát csak a kvantálás okoz a digitális rendszerben, a mintavételezés elvileg nem. Persze, a kettő úgyis együtt működik, és a cél az, hogy ezeket a hibákat már ne vegyük észre, ne lássuk meg a képen, ne halljuk meg a hangban. A túl finom felbontásra nincs szükség, hiszen egy idő után már a termikus, additív zajkomponenseket fogjuk kvantálni és finomítani, amire nincs szükség.



Analóg jel átalakítása PCM adatokká.



A mintavétel és visszaalakítás a frekvenciatartományban. A mintavétel hatására nem-átlapolódó módon ismétlődik az alapsávi jel spektruma (ha a Shannon-tételt betartjuk), amelyből egy aluláteresztő szűrővel az eredeti jelet hibamentesen visszanyerhetjük.



A természetes mintavételezés esetén – a Shannon szabályt betartva – a folytonos analóg jel aluláteresztő szűrő segítségével visszanyerhető.

Levezethető, hogy az aluláteresztő szűrőn átjutó, impulzusokból előálló időfüggvény egyenlete:

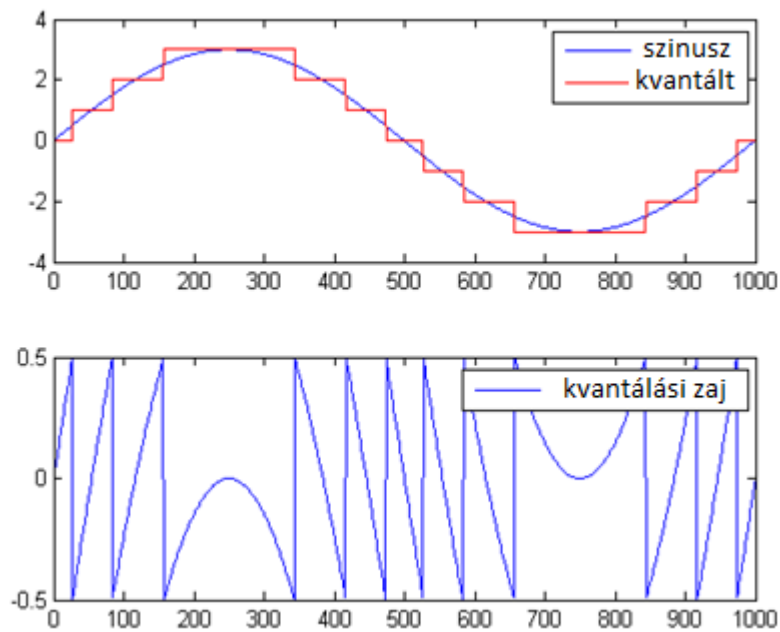
$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} f(t_{mv}) \frac{\sin[\omega_M(t - T_s)]}{\omega_M(t - T_s)}$$

A $\frac{\sin x}{x}$ függvények a mintavételi időpontokban éppen a minták értékeit veszik fel, és mindig csak annak az egy függvénynek van itt nullától eltérő értéke, az összes többi nulla. A függvények összege – a mintavételek közötti

időszakokban is – az eredeti időfüggvényt alakítja ki.

A visszaalakítás szemléltetése az időtartományban. Egy aluláteresztő szűrő az impulzust $\sin x/x$ alakúvá torzítja, amely a mintavételi időpontokban pontosan az eredeti jellel egyezik meg. Közötte pedig a hullámzások összegeként áll elő az eredeti jel.

Kvantálási zajnak nevezzük a kerekítési hibát (pontosan a hiba négyzetes várhatóértékét). Amennyiben egyenletes a kvantálás (minden lépcső azonos magasságú és q nagyságú), akkor a kvantálási zaj értéke $q^2/12$.



Kvantálási zaj

Általános ökölszabályként igaz, hogy amennyiben a kvantálást egy bittel megnöveljük a jel-zaj viszony (és vele együtt a dinamika) +6 dB-el javul. A 16 bithez tehát $16 \cdot 6 = 96$ dB tartozik, ami a CD minőség környéke hangtechnikában.

Természetesen úgy a bitszám, mind a mintavételi frekvencia növelése helyigénnyel jár. Ráadásul a kvantálás a kritikusabb folyamat, mintavételi frekvenciában nem gond akár a több MHz nagyságrend sem, ellenben 16-ról 24 bitre ugráshoz sokkal több idő, technika és pénz kellett. A digitális jel tehát számunkra a továbbiakban *időben és amplitúdóban is diszkrét* jelfolyam (bitstream), melynek minőségi követelményeivel fogunk foglalkozni.

A legfontosabb paraméter egy digitális jelátvitel során: a *bitsebesség*. Egy bit per másodperc (bps) az átvitel sebesség (sebességigénye) akkor, ha másodpercenként 1 bit kerül továbbításra, átvitelre. Ez egyben azt is megadja, mekkora tárolókapacitás szükséges 1 mp. anyaghoz: egy 768 kbps „sebességű” anyag 1 másodpercéhez 768 kbit-re van szükség. Célunk minden esetben az, hogy ezt csökkentsük, tömörítsük. A kép sokkal nagyobb hely- és sebességigényű, mint a hang. A későbbiekben látjuk majd, hogy 1 másodperc fekete-fehér mozgóképet 80 Mbit-et foglalna el a lemezen (10 MByte) tömörítés nélkül. A CD sebességét így tudjuk kiszámítani:

$$2 \text{ [csatorna]} * 16 \text{ [bit]} * 44100 \text{ [Hz]} = 1,4 \text{ Mbps.}$$

Ennyi tehát a sztereó CD minőségű hanganyag helyigénye (ún. *raw lineáris PCM*). A hang és képadatok tömöríthetőségével a későbbiekben foglalkozunk. Ez az érték azonban mindig nettó adatsűrűséget jelent, amelynek csak elvi jelentősége van. A valóságban ugyanis mindig tartozik ehhez hibajavítás, különböző azonosítók, keretek, szinkron információk is. Utóbbiakat együttes néven redundanciának hívunk, ezzel alakul ki a digitális átvitel bruttó adatfolyama. A bruttó adatfolyam a nettóhoz képest akár négyszerese is lehet! Minderre azonban feltétlenül szükség van, különben a rendszer nagyon érzékeny lenne az átvitel során keletkező hibákra. A CD rendszer nem azért jó, mert digitális, nem azért jó, mert jó a minősége, hanem azért, mert

rendkívül robusztus és jól működő hibajavítást tartalmaz! A CD lemezekben fellépő karcok, porszemcsék ellen tud úgy védekezni, hogy azt ne vegyük észre, ennek ára azonban a tárolókapacitás java részének „elpazarlása” a hibajavításra. Egy CD lemezen háromszor annyi redundancia van, mint hasznos adat!

A digitális **csatorna** hírközlésméleti fogalom. Matematikailag megragadható, nem más, mint ún. átmeneti valószínűségek halmaza. A csatorna egy leképezés, amely adott valószínűséggel képezi le a bemeneti adatot (bitet) a kimenetre. Pl., egy csatorna olyan átviteli modell, ahol a bemenetre adott „1” szimbólum 90%-os valószínűséggel „1”-ként jelenik meg a kimeneten, de 10% valószínűséggel (az additív zaj és egyéb hibák miatt) „0”-ként kerül dekódolásra, ami hiba. Annál jobb egy csatorna, minél jobbak a paraméterei. Persze, egy csatorna nem feltétlenül kétállapotú, ahogy a példa, hanem lehet tízállapotú is, ahol a számokat egytől tízig képezi, és nem feltétlenül szimmetrikus (azaz előfordulhat, hogy az 1-0 tévedés valószínűsége más, mint a 0-1 tévedésé). Számunkra a lényeg, hogy egy csatorna attól csatorna, hogy nem tökéletes és hibázik, ami ellen nekünk védekezni kell hibajavító kódolással. Legfontosabb paramétere az analóg jel-zaj-viszony:

SNR (signal-to-noise ratio) = $10 \cdot \log(S/N)$ [dB],

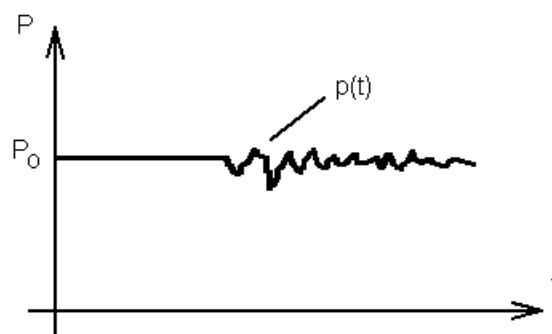
ahol S a jel (signal), N pedig a zaj (noise) teljesítménye. Minél nagyobb egy rendszer, erősítő, csatorna jel-zaj-viszonya, annál jobb a helyzet, hiszen annál nagyobb a hasznos jel aránya a zajhoz képest. Ez az érték digitális technikában is értelmezett, közvetlen kapcsolatban áll a felbontással (kvantálással). Mivel a digitális jel valójában szintén analóg feszültségjel (amely attól digitális, hogy csak 0 és 1 értéket vehetne fel), így az analóg jel-zaj-viszony közvetlenül hat nem csupán a csatornában közvetített analóg jelekre, hanem a digitálisakra is. Amennyiben az a szám alacsony és a csatorna analóg zajjal terhelt, attól a digitális jelek is zajossá válnak. Ennek eredménye, hogy a dekóder egyre nehezebben tud helyes döntést hozni, a hibajavítás kudarcba fulladhat, az átvitel minősége romolhat vagy akár meg is szűnhet. A zajos csatornában tehát egyre több bithiba keletkezik. Ha van rá lehetőség, a hibajavítás növelésével védekezhetünk ellene, ez azonban a hasznos adatfolyam sebességét fogja csökkenteni. Modern, ún. hierarchikus kódolók (pl. DVB televízió rendszereknél a műsorszórásban) képesek arra, hogy a csatorna zajosságához igazodva dinamikusan változtassák a minőséget, adaptálódva a gyorsan változó csatornához. Ne feledjük: a digitális jelek is analóg csatornákon (kábelben, levegőben) terjednek, így annak minősége szoros kapcsolatban áll a kimenet minőségével.

3. Hang, beszéd, hallás

Fizikai jellegét tekintve a hang valamilyen rugalmas közeg mechanikai rezgéséből áll. Szilárd anyagokban az úgynevezett testhang, cseppfolyós anyagokban a folyadékhang és levegőben a léghang keletkezik és terjed. Az emberi fül döntően a levegőben terjedő hangokat érzékeli, ezért a léghanggal kapcsolatos ismeretek (pl. hangkeltés, terjedés, érzékelés stb.) kiemelt jelentőségűek.

A léghang légnyomásingadozás formájában jelentkezik. Az állandó értékűnek tekinthető légköri nyomásra szuperponálódik a hangnyomás. A tér egy pontjában az eredő $P(t)$ légnyomás a P_0 -al jelölt konstans légköri nyomás és a változó $p(t)$ összegeként adható meg:

$$P(t) = P_0 + p(t)$$



A hangnyomás időfüggvénye.

A továbbiakban csak az időben változó második taggal, a hangnyomással fogunk foglalkozni. A hang fizikai jellemzésére leggyakrabban a hangnyomás effektív értékét szokás használni. A hangnyomás szabványos mértékegysége a Pa, ami 1 Newton erőhatást jelent 1 m² felületen. (A konstans légköri nyomás közelítőleg 100 000 = 10⁵ Pa). A hangnyomás értékét mérőmikrofonnal mérjük. Méréskor gyakori szokás az, hogy a mért hangnyomás és egy referencia érték arányát adják meg dB-ben. Ilyenkor a szabványos referencia 20*10⁻⁶ Pa, ami az átlagember számára az éppen meghallható 1000 Hz-es szinuszhang nyomásértéke. A hangnyomásszint tehát (dB SPL):

$$L_p = 20 \lg \frac{P}{P_0}$$

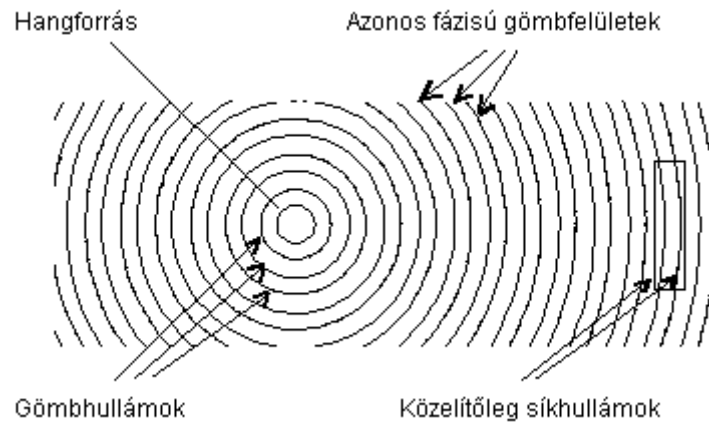
Jegyezzük meg, hogy a decibel (dB) nem mértékegység, mert dimenzió nélküli szám (hiszen pascal/pascal kesik). Ez csak egy jelölés, amely felhívja a figyelmet arra, hogy logaritmizált arányszámról van szó. A hangnyomás skaláris mennyiség.

A hanghullámok azonos fázisú pontjai közötti távolságot hullámhossznak nevezzük. A hullámhossz és a frekvencia szorzata egy állandó érték, ami a hang terjedési sebessége.

$$c = f\lambda$$

A hang terjedési sebessége kb. $c = 340$ m/s, de ez erősen hőmérsékletfüggő. Vegyük észre ennek következményét: azonos frekvenciájú rezgés különböző közegben más hullámhosszú. Ha a hang forrása pontszerű, és ha a térben a hang minden irányban akadálytalanul terjedhet, akkor *szabadtéri* terjedésről beszélünk, és gömbhullámok keletkeznek. A hangforrástól nagy

távolságra az azonos fázisú gömbfelületek alig görbülnek, ezért ezeket már síkhullámoknak tekinthetjük.



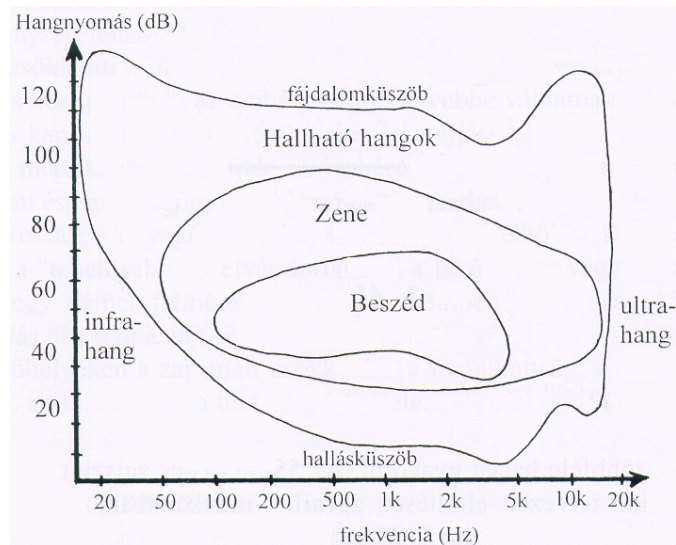
Pontforrás által kibocsátott hullámok kellő távolságban síkhullámmal közelíthetők.

A hang jellemezhető még az időegység alatt a felületegységen áthaladó energia nagyságával is. Ezt nevezzük hangintenzitásnak, értékét a hangnyomás és a részecskesebesség szorzataként számítjuk:

$$I = p v.$$

Az intenzitás a sebesség miatt vektoriális mennyiség, iránya is van. Gyakran viszonyítva, dB-ben kifejezve adjuk meg. Könnyen belátható, hogy a viszonyítási alap $I_0 = 1 \text{ pW/m}^2$, ami az 1000 Hz-en éppen meghallható szinuszhang intenzitásértéke. Az intenzitásszint (dB) tehát:

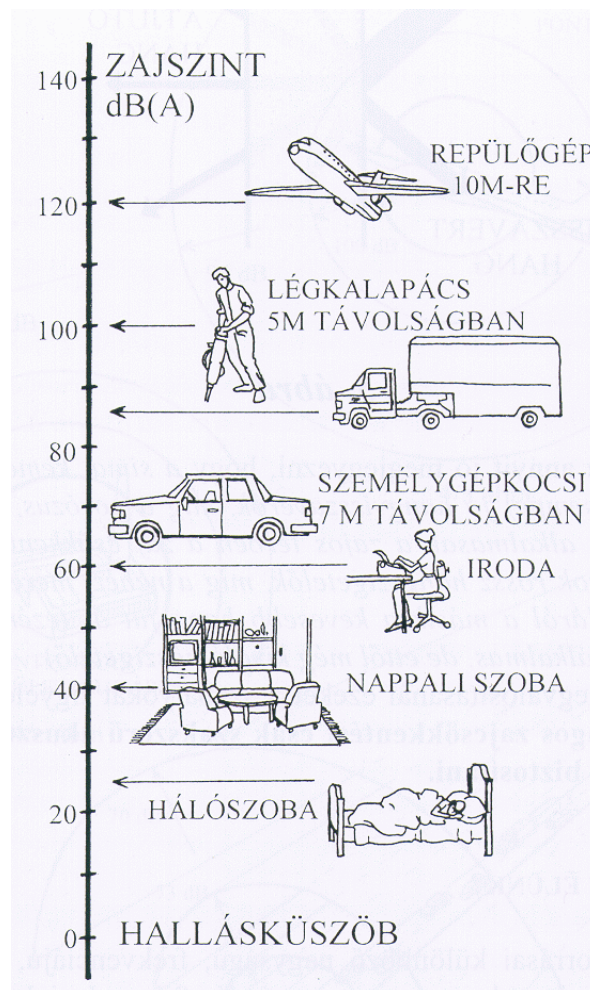
$$L_i = 10 \lg (I/I_0).$$



A hallástartomány.

A hallhatóság tartománya frekvenciában kb. 20 Hz és 20 kHz közé esik. A *hallásküszöb* a leghalkabb, még éppen meghallható hangok frekvenciafüggését mutatja. 1 kHz-es szinuszjel

esetén ez éppen 0 dB. Az ábrán látható, hogy a hallhatóság a kis frekvenciák és magasabb frekvenciák felé is egyre nagyobb hangnyomásszintet igényel, azaz pld. egy 50 Hz-es hangot már 40-50 dB-el kell kiadni ahhoz, hogy meghalljuk, itt a hallásunk érzéketlenebb. A hallás a 2-4 kHz tartományban a legérzékenyebb, ez a beszédhangok legfontosabb tartománya. Megjegyezzük, hogy léteznek más mértékegységek is, mint a *phon* és a *son*, melyek az azonos hangerősségű, hangosságú hangokat hasonlítják össze (pl. 0 phon az értéke egy 0 dB-es 1 kHz-es és egy 50 dB-es 50 Hz-es hangnak is, mert ezt a fülünk azonos hangerősségűnek érzékeli). A nagyon erős hangok fájdalomérzetet keltenek. Ezt a határt *fájdalomküszöbnek* nevezzük. Ennek görbéje már nem annyira frekvenciafüggő. E korlátokon belül találhatóak a zene és a beszéd tartományai. Jól látható, hogy a zene frekvencia és dinamikahatárai lényegesen nagyobbak, mint amelyekkel a beszéd rendelkezik.



Különböző hangnyomásszintek.

A hangnyomás szintek megállapítása méréssel történik. A „csend” gyakorlatilag 20-40 dB-es alapzajnak felel meg. Egy átlagos utcazaj 70-80 dB-t is eléri. 100 dB felett halláskárosodás veszélye áll fenn, ilyenkor hallásvédőt érdemes használni. A halláskárosodás eleinte csak átmeneti (füldugulás, fülszűrés), később tartóssá válhat. Óvatosan kezeljük a dB-ben megadott hangnyomás szinteket, és emlékezzünk, hogy kétszeres hangerőhöz +3 dB növekmény tartozik! Ez azt jelenti, hogy a 103 dB a 100 dB-hez képest kétszer olyan hangos!

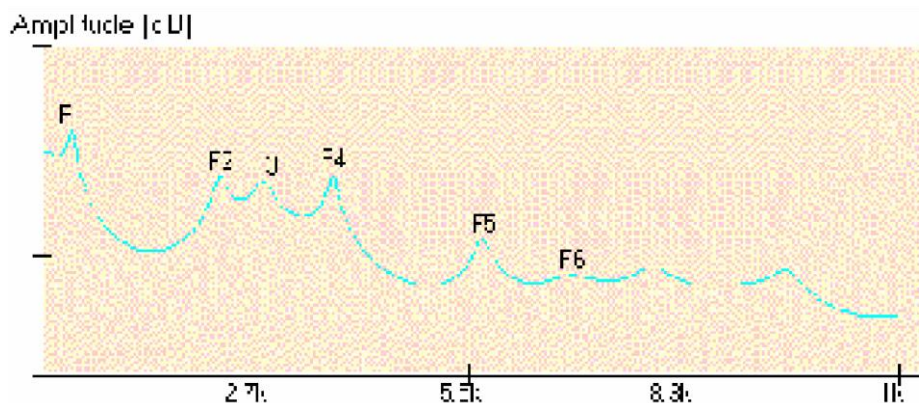
3.1 A beszéd

A beszéd a legfontosabb akusztikai jel, az emberi kommunikációnak és az éneknek az alapja. Fiziológiailag a tüdőből kiáramló levegő hangszalagok általi periodikus modulációjáról, és az orr-szájüreg módusai által befolyásolt hullámterjedésről van szó.

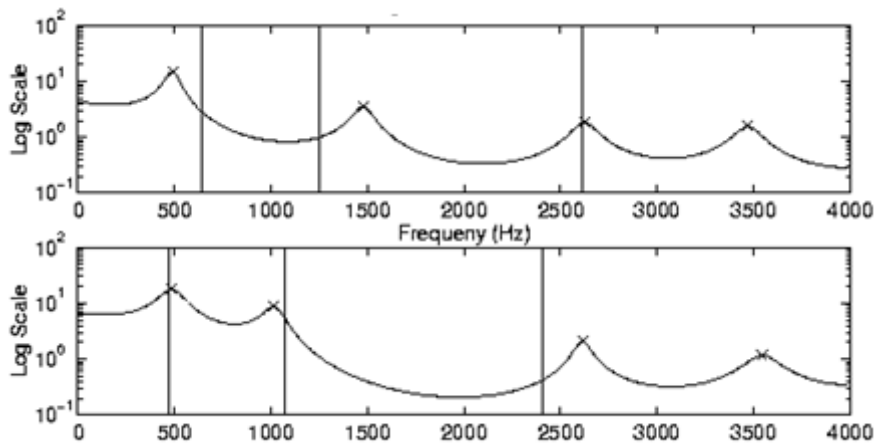
A beszéd, úgy a telefónia, mind a stúdiótechnika (rádióriport, ének) fontos eleme. Szerencsére, a beszéd megértéséhez nincs szükség HiFi átvitelre, a telefonok szokásos 300 – 3400 Hz-ig terjedő sáv szélessége elégséges. Ennek oka, hogy a beszéd (hang)energiájának nagy része ebben a sávban található meg, az e fölötti frekvenciakomponensek már nem az érthetőséget, hanem a beszélő személyére jellemző „orgánumokat” hordozzák. Így fordulhat az elő, hogy számunkra jól ismert embert elsősorban nehezen ismerünk fel a telefonban a hangja alapján, de ez nem is követelmény! A telefonátvitelnek az érthetőséget kell biztosítani, valamint azt a lehetőséget, hogy többszöri, rendszeres beszélgetés után már ismerjük fel a másikat a vonal végén.

A műszaki, objektíven mérhető paramétert *beszédérthetőségnek* nevezzük. Létezik mondat-, szó- és ún. szótag- vagy logatom-érthetőségi vizsgálat is. Ilyenkor kísérleti személyeknek mondatot, értelmes szavakat vagy értelmetlen szótagokat olvasnak fel, amit le kell jegyezniük vagy eltalálniuk egy listából (%-ban adják meg az eredményt). Természetesen, mondatokat és értelmes szavakat sokkal könnyebb felismerni, mert az ember nyelvtudása segít kijavítani a hibákat. Ezért ez a vizsgálat jobb, de hamisabb eredményeket szolgáltat, ugyanakkor jobban közelíti a valóságot, hiszen aligha fogunk egy telefonbeszélgetés során értelmetlen szótagokat makogni. A beszéd egyik legfontosabb jellemzője, hogy hibajavítást és redundanciát tartalmaz, csak egy korlátos szókészletből (és nyelvtani szabályokból) alkot értelmes mondatot (információt).

A beszédjel frekvenciatartományi képében lényeges információkat tudunk elkülöníteni. Az első és legfontosabb az **alaphang**, ami férfiaknál 90 Hz körüli, nőknél 300 Hz környékén van. Ez az, ami a hangszalag rezgéséből adódik. A beszédenergia nagy része 3 kHz környékén van, felette az ún. **formánsok** találhatóak.

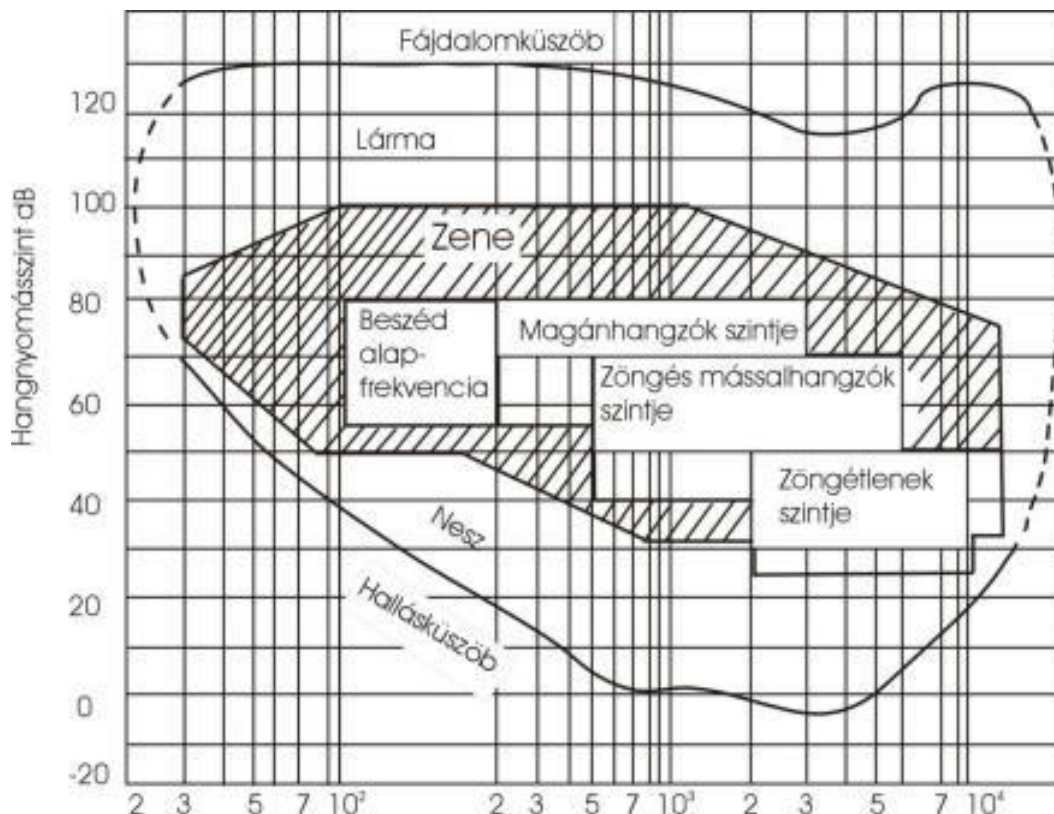


Beszédhang formánsai F1-től F6-ig.



Két különböző magánhangzó formánsstruktúrája.

A formáns tipikusan beszédfeldolgozási fogalom, nem más, mint az amplitúdóspektrum jellemző, adott kis tartományra szorító „csúcs”, helyi maximuma. Jelei rendre F_1 , F_2 ...stb..., egészen 15 kHz-ig eltartanak. Ezek a formánsfrekvenciák egyrészt egyértelműen jellemzik a magánhangzókat (alaphang és formáns struktúra első három eleme), másrészt ez adja a személyiségre jellemző jegyeket (a szájüreg által jönnek létre, F_4 - F_{10}). A magánhangzók periódikus rezgések, a mássalhangzók nem. Utóbbiak lehetnek zöngések és zöngétlenek, ha a hangszál nem vesz részt a képzésben. A mássalhangzók spektrumában nincsenek formánsok. A beszéd teljesítmény átlaga kb. $20\mu\text{W}$, a kiabálás elérheti a 100mW -ot. A dinamikatartomány (a leghalkabb suttogástól a lehangosabb kiabálás aránya) kb. 50 dB.



A hallástartomány és a beszéd hangzói által elfoglalt területek.

A HiFi átvitel régi, német DIN szabványa szerint 50 Hz–15 kHz-ig kell átvinni, 0.1% torzítás mellett. Ezt az FM rádiók, kazettás magnók és a hanglemezek már teljesítették. A CD szabványban 20 Hz–20 kHz az átviteli sáv, a torzítás gyakorlatilag nem értelmezett. *Frekvenciatartomány*nak általában a 3 dB-es pontok közötti részt értjük, azaz azt a sávot, amelynek két szélén az átviteli karakterisztika 3 dB-t esik (félteljesítményű pontok távolsága a középfrekvenciához képest). A *dinamika* a leghalkabb és leghangosabb jelszint aránya dB-ben, ebből következik, hogy a dinamika mindig kisebb egyenlő, mint a jel-zaj-viszony, azt nem haladhatja meg. Ideális az a rendszer, ahol a dinamika egyenlő a jel-zaj viszonytal. Az átvitel másik fontos paramétere a *torzítás*, ami lehet lineáris vagy nem lineáris, ezzel már találkozunk. A harmonikus torzítás (THD, total harmonic distortion) a többszörös frekvenciák effektív értékének és az alaphang (ált. 1 kHz) effektív értékének a hányadosa %-ban megadva. A *zene* hangszeres hangkeltés. A hangszerek lehetnek tonálisak, harmonikus felhangokból és alaphangból álló rezonátorok (gitár), vagy zajszerűek (dobok). A nagyzenekar teljesítménye elérheti a 70 Wattot, de átlagteljesítmény ekkor is csak 0,1 W körüli.

3.2 A hangtér előállítása

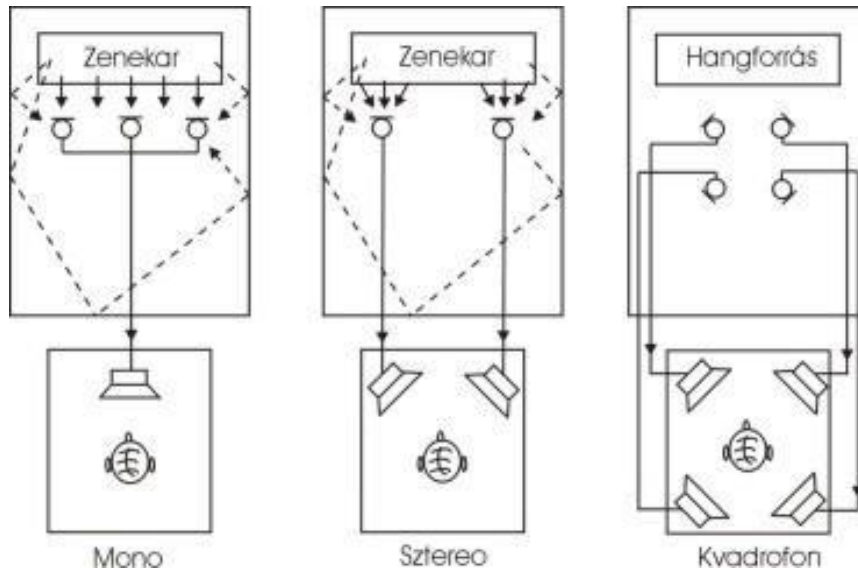
Az elérendő cél olyan mesterséges hangtér előállítása, amely tartalmaz minden lényeges információt a fül számára. Természetesen, ez a követelmény más és más az egyes összeköttetésekben, hiszen a fül által érzékelhető egész frekvenciasávra, a mintegy 130 dB dinamikára, valamint a hangforrások lokalizálhatóságára nincs mindig szükség.

A hangtér előállítása történhet hangszórókkal illetve fejhallgatóval. A hangtér előállításának különféle lépései és eszközei vannak. Az eredeti hangtérben történik a *hangvétele*, amelynek eszköze a *mikrofon*. Esetenként több mikrofont kell használnunk. A mikrofonok a hangnyomással arányos jeleket állítanak elő, amelyeket a következő lépésben *jelfeldolgozásnak* vetünk alá. Ilyen feldolgozás például az egyes jelek megfelelő arányú összegzése, zengetése vagy szűrése stb. A feldolgozás történhet analóg vagy digitális eszközökkel. A feldolgozott jel az átviteli *csatornába* kerül, ami lehet vezetékes vagy vezeték nélküli összeköttetés. Egyszerűbb esetekben (pl. távbeszélő-összeköttetés) kifejezett jelfeldolgozásra nincs is szükség. A csatornán megérkezett jelet a *vevő* fogadja és átalakítja azt olyan módon, hogy alkalmas legyen a *hangszórók* illetve *fejhallgatók* táplálására. Ezek az átalakítók az elektromos jelből hangjelet állítanak elő. A hangszóró ill. hangszórók által keltett hangtér sokban függ a helyiség teremhangtani tulajdonságaitól is. Természetesen, a fejhallgató keltette hang a fülben független ezektől a jellemzőktől.

A jelátvitel speciális esete az, amikor a feldolgozott jelet valamelyik *hangrögzítőre* vezetjük. Ebben az esetben a hanghordozó (pl. hanglemez, kazetta stb.) jut el a fogyasztóhoz, aki tetszése szerinti időpontban hallgathatja meg (lejátszás) a műsort, vagyis az eredeti hangtér és a mesterséges hangtér megjelenése között nincs időbeni kötöttség.

Ha a hangtér leképzéséhez csak egy mikrofonnal vesszük a jelet, vagy több mikrofont használunk ugyan, de ezek jeleit összegezzük, akkor egycsatornás, más néven *mono* összeköttetést valósítunk meg. Az egy jelből reprodukált hangtérben semmiféle irányfelismerésre nincs lehetőség. A meghallgatott műsorban megszólaló összes hangforrás csak az egyetlen hangszóró irányából lesz hallható.

A térérzet kialakításához a hangtérből legalább két független, jól megválasztott jelet kell venni, és azokat külön csatornákon továbbítani. Ez a 60-as években bevezetett, és azóta széles körben elterjedt *sztereo* rendszer, amelyet kidolgoztak az URH rádiózásra, valamint a különféle hangrögzítő megoldásokra is. A legjobb térérzet úgy alakul ki, ha a műsor lejátszásakor, illetve meghallgatásakor a két hangszóró és a hallgató egy egyenlő oldalú háromszög csúcsait alkotják.



A hangtér előállításának módjai

A sztereó jel mono kompatibilis. Két elterjedt jelöléssel:

S (Stereo, Seite) = $B - J$, az ún. különbségi jel, amit rádiózásban modulálásra használunk fel.

M (mono, Mitte) = $B + J$, az összeg jel.

Ebből is látszik, hogy a két csatornát, a két független információt kétféleképp is megragadhatjuk: egyszer Bal-Jobb elven (szokták még X-Y elrendezésnek is nevezni a mikrofonozások során), vagy pedig S-M módon. A kettő matematikailag egyenértékű és egymásba átszámítható, egymással kiváltható. A két hangszóró közötti részt *bázisnak* hívjuk. Helyes hangszóró-polarizáció esetén a hang mindig a bázisban marad.

Meg kell említeni, hogy a stúdiótechnológiák régi aranykorukat a sztereó bevezetésekor élték, amelyek fél évszázad után kezdtek idejelműlttá válni. Korábban a két csatornához két mikrofont használtak, és valóban egyszerre két csatornán rögzítettek. Manapság a stúdiókban pusztán egy dobfelszerelésnek van egy tucat mikrofonja, és egy felvétel effektekkel, hangszereléssel elérheti a több tucat csatornát is, amiből a hangmérnök *kever ki* sztereót (vagy bármi egyéb, 5.1-es hangteret).

Régen két lehetőség állt rendelkezésre (elvi szintű tárgyalás). Az ún. *időkülönbséges sztereofónia* alapja, hogy a két fülbe a jel **nem azonos időben** érkezik be (de azonos hangerősséggel). A forráshoz (most feltételezünk egy darab hangforrást) közelebbi fülbe előbb fog a hang beérkezni, és ez alapján fogjuk az irányt megállapítani tudni. Ha tehát két hangszóróból időkésléttetéssel jön a hang, eltolódást fog okozni a hangérzetben és viszont, ha egy mikronhoz eltérő távolságba teszünk forrásokat, azok eltérő időben érkeznek be. 50 ms felett visszhangot fogunk érzékelni (echoküszöb). Az időkülönbséges sztereofónia során két mikrofont használunk, amelyeket egymástól adott távolságra, 1-3 méterre helyezünk el a zenekar előtt és a rögzítés során automatikusan létrejön a B és a J csatorna.

Az ún. *intenzitásos sztereofónia* során a másik lehetőséget használjuk ki: ha a fülekbe azonos időben érkezik két jel, amelyek hangerőssége, **hangintenzitása különböző**. Azt fogjuk közelebbinek hallani, amelyik hangosabb. Ha tehát veszünk két mikrofont, és egy pontban (koincidencia mikrofon) helyezük el őket, de a nem gömbi iránykarakterisztikákat adott nyílásszögűre állítjuk, akkor a mikrofonok ezen érzékenységéből adódóan létre fog jönni a térérzet (S-M jelleggel). Az iránykarakterisztika (lásd később) ugyanis a különböző irányokból

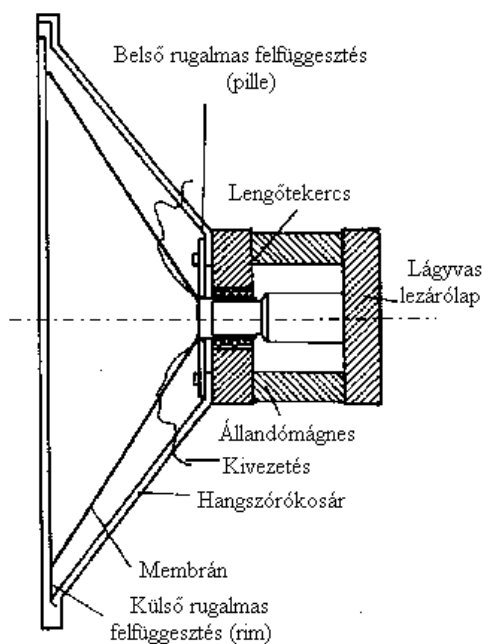
eltérő érzékenységgű, azaz egy adott hangforrásból a két mikrofon más szintet fog venni. Fontos, hogy ilyenkor (mivel a két mikrofon egy pontban van, tehát időkülönbség nem léphet fel), a térérzet a két csatorna közti intenzitás különbségből fog adódni, aminek fizikai oka a mikrofonok iránykarakterisztikája! Ez persze lehet egyforma mindkettőre nézve, csak nem nézhetnek egy irányba.

A fenti ábrason tüntettük fel a legjobb térérzetet keltő négycsatornás, úgynevezett *kvadrofon* elrendezést is. Itt a hallgatóság a négyzet sarkaiban elhelyezett hangszórók által keltett tér belsejében foglal helyet. A legjobb térhatás a négyzet középpontjában jelentkezik. Ezt a rendszert a 70-es években dolgozták ki, de pénzügyi okok miatt széles körben nem terjedt el. Ehelyett a technika az ezredfordulón érte el a moziból kilépve és otthonunkba beköszönve a sokcsatornás surround hangzást, 5.1-től akár 7.1 csatornáig. A fejlődés sosem áll meg. A stúdiótechnika a mono felvétel és átvitel után jutott el fokozatosan az oly sikeres sztereóhoz, a többcsatornás, teljes surround rendszerekig, amely manapság 22 csatornát is elérhet.

3.3 Elektroakusztikai átalakítók

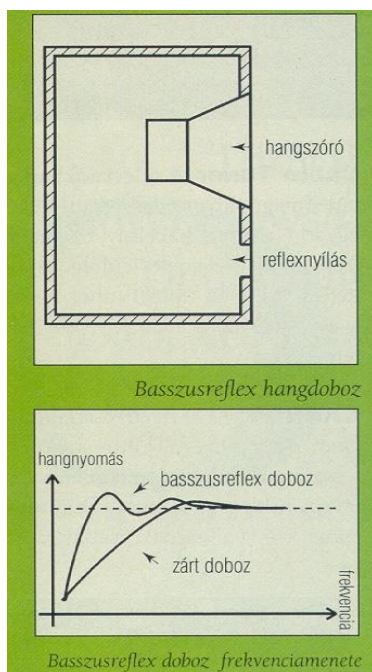
Az elektroakusztikai átalakítók olyan eszközök, amelyek az elektromos energiát hangenergiává, a hangenergiát pedig elektromos energiává alakítják át. Az átalakítás két lépésben történik. Az első lépésben az elektromos energiát alakítjuk mechanikai energiává. Ennek a folyamatnak az eszköze a valamilyen elektromos vagy mágneses erőhatáson alapuló *elektromechanikai átalakító*. Az átalakító szerves része egy mechanikai rezgőrendszer, amihez mereven kapcsolódik a nagyfelületű *membrán*. A mechanikai mozgási energiát ez a membrán továbbítja a légtérbe, úgy, hogy a membrán mozgásba hozza a levegő részecskéit, és az energia hanghullámok formájában tovaterjed. *Inverz* működés esetén a fenti folyamat fordítva zajlik le, vagyis a beérkező hanghullámok mozgásba hozzák az átalakító mechanikai rendszerét, majd a mozgással arányos jelet kapunk az átalakító elektromos kapcsain.

A hangjelek széles választékát kell továbbítani, illetve rögzíteni. Ennek megfelelően sokféle, különböző típusú és minőségű mikrofonokat használunk a hangvétel céljaira. A mikrofonok jellemzésére az érzékenységet, az érzékenység frekvenciamenetét és az iránykarakterisztikát szokás megadni. Az *érzékenység* az egységnyi hangnyomás hatására leadott feszültséget jelenti. A *frekvenciamenet* az érzékenység frekvenciafüggését jelenti. Az *iránykarakterisztika* a beérkező hanghullámok irányától való érzékenységfüggést fejezi ki. A mesterséges hangtér előállításának utolsó lépése az elektromos energia hangenergiává alakítása. Ennek legfontosabb eszköze a hangszóró. A mikrofonokhoz hasonlóan a hangszórók is különféle kivitelben készülnek. Legnagyobb példányszámban az úgynevezett *dinamikus* hangszóró van forgalomban. Az állandó mágneses mágneskör légrésében található a lengőcséve, ami a kúpos membránhoz csatlakozik. A membrán tengelyirányú mozgását a külső és a belső megfogások (rim, pille) biztosítják. A mágneskörhöz rögzített kosár tartja a rimet, és a hajlékony tekercskivezetések is a kosáron végződnek. A kivezetéseken a tekercsbe áramot bocsátunk. Az áram és a mágnes tér kölcsönhatásaként tengelyirányú erő keletkezik. Az erő mozgásba hozza a nagy felületű membránt és ezáltal hanghullámokat kelt. Kiseb minőségi igényekre (pl. AM rádióvétel) elegendő egy hangszóró. A teljes hangfrekvenciás sávot több - két vagy három - különböző frekvenciasávra tervezett hangszóróval lehet lesugározni.



A dinamikus hangszóró.

A fejhallgatók speciális, csak a fülre korlátozódó hangteret állítanak elő. Közsükségleti célokra leggyakrabban *dinamikus* hallgatókat gyártanak. Ezek felépítése olyan, mint egy lekicsinyített dinamikus hangszóró. A kis méretekkel megvalósítható a szélessávú átvitel. A dinamikus hangszórót dobozba építjük, amivel erősen befolyásoljuk annak átviteli függvényét. A doboz feladata kettős: egyrészt mechanikai tartószerkezet, másrészt elszigeteli a membrán két oldalát egymástól (megszünteti az ún. akusztikus rövidzárát), és ezáltal a kis frekvenciás átvitelt javítja. Szokás még a mélyfrekvenciás átvitel növelésének érdekében reflexnyílást nyitni a dobozra.

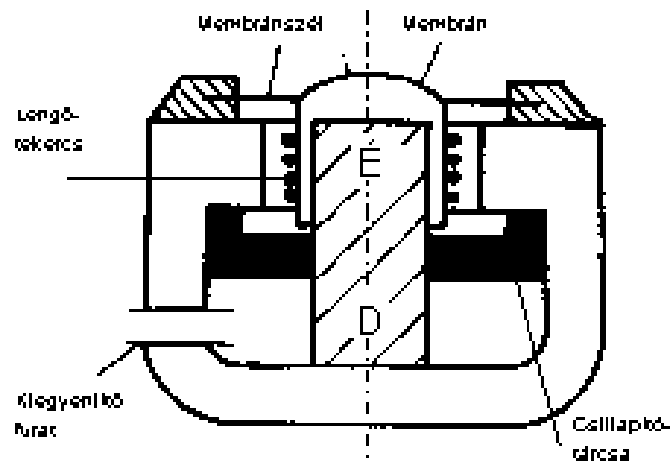


A hangdoboz és a reflexnyílás.

A mikrofonok legfontosabb paramétereit:

- működési elv
- frekvenciaátvitel (átviteli függvény), az érzékenység frekvenciamenete
- fázisátvitel
- zaj
- membrán méret
- érzékenység
- max. elviselhető hangnyomásszint
- iránykarakterisztika és annak állíthatósága
- kimeneti impedancia
- fizikai kiképzés
- tápfeszültségigény.

A *dinamikus* mikrofonok kevésbé jó minőségűek, mint a *kondenzátor* mikrofonok. Gyakorlatilag a dinamikus hangszóró inverze: a hangnyomás által megmozgatott membránhoz csatlakozott lengőcséve az állandómágneskör részeként mozgásba jön a légrésben. Ennek hatására feszültség indukálódik benne, a membránmozgással arányosan. Felső határa kb. 17-18 kHz, és eléggé keskenysávú az átvitel (ezért alkalmaznak akusztikus kompenzálást a fedéllel és a mágneskör megfűrésével). Olcsók és tápfeszültséget sem igényelnek. Hangosítási célra még megfelelő, de stúdiófelvételre már kevésbé, mérési célokra pedig egyáltalán nem.



A dinamikus mikrofon.

A kondenzátor mikrofon elvben aluláteresztő jellegű, de a felső törésponti frekvenciája magas lehet. Az átalakítás elve, hogy a membrán (fémfólia) és az ún. alsó fegyverzet mögött egy lötyögő fegyverzetű kondenzátort alkot, amelynek légrése változik a membrán mozgásának hatására. Ezáltal a kondenzátor kapacitása is (a távolsággal fordítottn) arányosan módosul. Ezek a mikrofonok DC feszültséget igényelnek (ún. előfeszítést vagy prepolarizációt) a működéshez, ezért a kapacitás megváltozásakor elektronok áramolnak a fegyverzet felületére vagy onnan el, azaz a hangrezgéssel arányos áram fog folyni. Ez általában kicsi, ezért erősíteni kell, így a kondenzátor mikrofon nem csak tápfeszültséget, hanem erősítőt is igényel (pre-amp, előerősítő). Ez vagy a mikrofon nyelével vagy külön egységként vásárolható meg. Hangstúdióban inkább ilyeneket használunk.



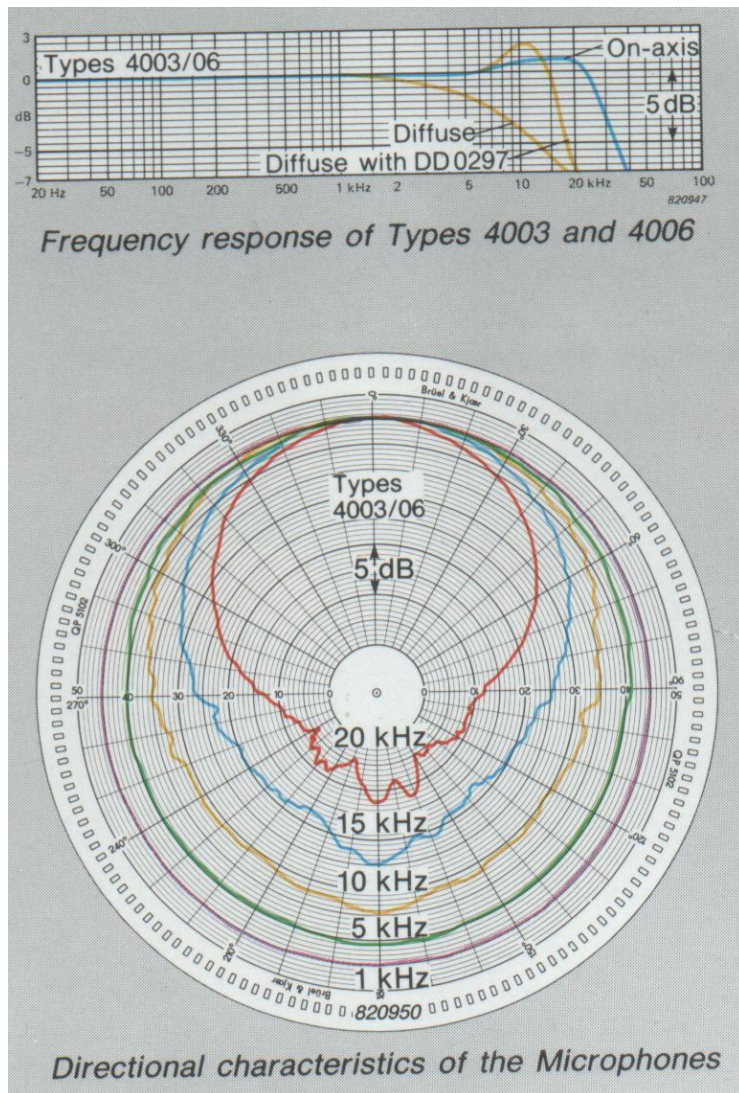
A kondenzátor mikrofon.

Az *átviteli függvény* az érzékenység frekvenciamenete. Az érzékenység adja meg, hogy egy mikrofon adott hangnyomásra (a membránján) mekkora kimenő feszültséggel válaszol. Minél nagyobb ez az érték, annál jobb a mikrofon, hiszen annál érzékenyebb: adott hangnyomásszinthez nagyobb feszültség tartozik (jobb jel-zaj-viszony) ill. kisebb hangnyomásszinten is használható az eszköz, mert lesz mérhető kimenő jelszintje. Ez a paraméter – többek között – függ a membrán méretétől: minél nagyobb a membrán felülete, annál nagyobb az érzékenység, hiszen több hanghullámot tud „befogni”. Nagy membránú mikrofont csak drágán lehet gyártani, kis méretűt azonban olcsón is. Utóbbiak előnye, hogy a hangteret a kis membrán kevésbé zavarja, ezért jobb (pl. kis méretű szólóhangszernél fontos lehet).

Az iránykarakterisztika a legfontosabb paraméter, az átviteli függvény térbeli változást írja le: különböző irányokból milyen a vétel erőssége (mint egy antennánál). Általában szintfelületekkel ábrázoljuk, ahol az azonos vételi pontokat kötjük össze, hasonlóan a térképeken, ahol az azonos magasságú pontokat kötjük össze.

Kis frekvencián kevésbé irányítottak a mikrofonok, míg nagyobb frekvencián egyre jobban. Az ún. puskamikrofon pld. erősen „ránéz” a hangforrásra. Ha szemléletes példát akarunk mondani, a gömbkarakterisztikájú, irányérzéketlen átvitel olyan, mint a szabadon lógó villanykörte: minden irányból egyforma fényesség és sugárzás tapasztalható, míg az irányított karakterisztika olyan, mint egy reflektor. A legjobban kedvelt kismértékű irányítottságú karakterisztika a vese (kardiod). Ezek szemből maximális, oldalról és hátulról csökkentett érzékenységűek. Létezik még a nyolcas karakterisztika, de ezt manapság ritkán alkalmazzák.

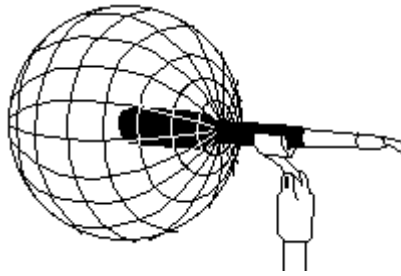
A *kis impedancia* is előnyös egy mikrofonnál, ez ugyanis arányos a saját zajjal, így ha illesztjük az eszközt erősítőhöz, keverőhöz, jobb eredményt kapunk.



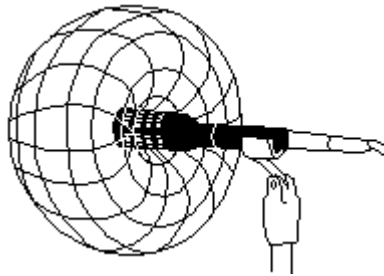
Mikrofon iránykarakterisztikája.



Jellegzetes nyolcas karakterisztika



Gömbkarakterisztika. A mikrofon irányérzékenlen (omnidirectional), mert minden irányból azonos a vétel, mindegy hogyan tartjuk a mikrofont felvétel közben.



Kardioid karakterisztika

Az *erősítők* feladata, hogy lineáris átvitelrel, frekvenciafüggetlenül erősítsék a jeleket. Elektronikában már megismertük, hogy milyen erősítő osztályok léteznek a működés szempontjából:

A osztály: Olyan erősítőfokozat, amelyben az erősítendő jel pozitív és negatív jelperiódusait is erősítjük. Igen magas a nyugalmi áram, amely a maximális kimenő áramnak a fele (terhelésen folyó áram fele), így az áramfelvétele igen nagy. Melegszik és elméleti hatásfoka se lehet jobb 50%-nál, viszont lineáris.

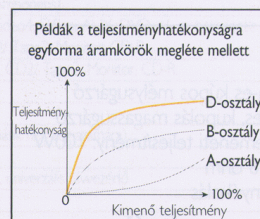
B osztály: Olyan erősítőfokozat, ahol a pozitív és a negatív jelperiódust külön elemek erősítik. Nulla a nyugalmi árama, így csak a bemenő jel függvényében melegszenek, hatásfokuk jó. Hátránya a jelátmenetek és kapcsolások esetén fellépő torzítás.

AB osztály: az A és B közötti beállítási kompromisszum: jó hatásfok, kis torzítás.

D osztály: kapcsoló üzemmód, erősítés és fogyasztás csak kapcsoláskor van. Jó hatásfok. Digitális impulzusokkal dolgozik. Csak az idő kb. 50-60%-ban folyik áram, így kisebb a veszteség és a hűtőborda mérete. A megbízhatóság is jobb, majdnem 90% hatásfokkal működik.

D-osztályú erősítő

Mivel a D-osztályú erősítő még az A-, B- és C-osztályú erősítőknél is kisebb teljesítményvesztéssel rendelkezik, a hőtermelés és a hőkiszugárzás nagyon alacsony mértékű. Ezáltal a D-osztályú erősítő - habár meglehetősen kis méretű - erőteljes mély hangokat képes előcsalni egy mélyhang-kiemelőből.



A, B és D osztályú erősítés.

4. Látás és képtechnikai alapok

A szemünk a legfontosabb érzékszervünk. Az állókép rögzítése, tárolása, későbbiekben pedig a mozgókép előállítás és továbbítása jelentette a feladatot. Legelőször néhány alapvető fénytechnikai alapfogalommal ismerkedünk meg. A fénytechnikai mennyiségek leírásának három módja ismeretes: az érzékelés szerinti (szubjektív, nem mérhető), a pszichofizikai jellemzők alapján, amelyek figyelembe veszik az emberi érzékelést, végül a tisztán fizikai jellemzők (objektív, radiometriai fizikai mérések),

A szín a látható sugárzás jellemzője, megadhatjuk a frekvenciájával vagy a hullámhosszal. Az emberi szem számára a három legfontosabb érzeti jellemző a

- világosság (fényssűrűség): adott felület mennyi fényt bocsát ki
- színezet: milyen színű valami (kék, vörös stb.)

- telítettség: valamilyen érzékelt szín azonos világosság mellett mennyire telített fehérrel (világoskék, sötétzöld, halványpiros).

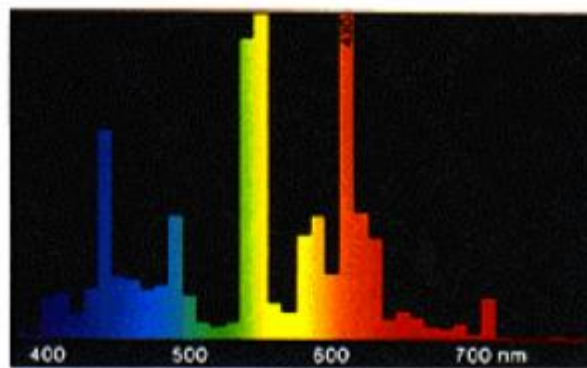
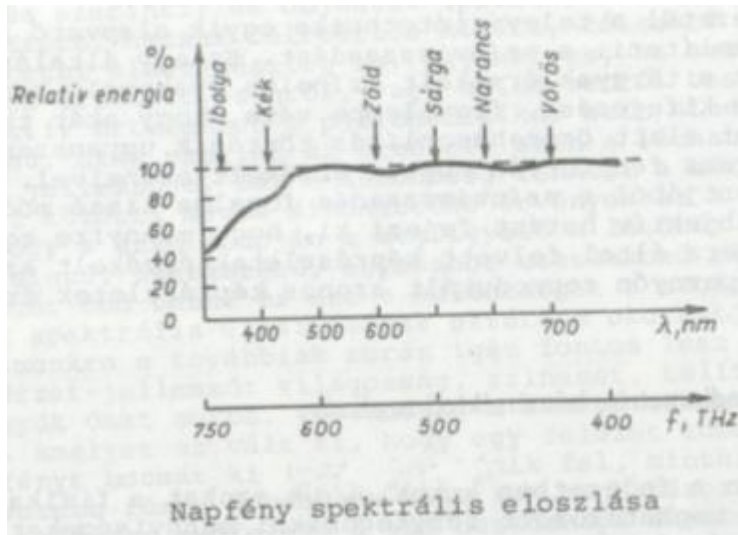
A világosságinformáció a fekete-fehér információnak felel meg. Nagyon fontos megjegyezni, hogy a fehér, a fekete és a köztes szürkeskála elemei nem színek, hanem fényssűrűség információ. A fehér „erősen sugárzó fekete”, míg a fekete tekinthető egy „lekapcsolt fehérnek”.

A fehér fény (Nap) minden színből tartalmaz komponenseket.

A szemünk két és három dimenzióban is érzékeli a teret, s bár 3D technika létezik, elsősorban a 2D képtechnikával foglalkozunk. Ahogy két fül szükséges a térhalláshoz, úgy két szem szükséges a térlátáshoz. A szemünk képes a mozgás érzékelésére is. A mozgás a való világban folytonos, képátvitel esetén azonban állóképek sorozatából áll. Ahhoz, hogy a szemünk folytonos mozgást érzékeljen, és ne akadozzon a képfolyam, legalább 25 kép/mp-re (frame per second, fps) van szükség. Ez azonban még a szemünkben a fényingerek ki-bekapcsolása okán villogásként érzékelhető. Átviteltechnikában legalább 50 kép/mp-re van szükség ahhoz, hogy ez a zavar megszűnjön. Ezt nevezzük *fúziós frekvenciának*, amikor a fény ill. színingerek változása kellően gyors ahhoz, hogy a szemünk ne érzékelje a képkockákat.

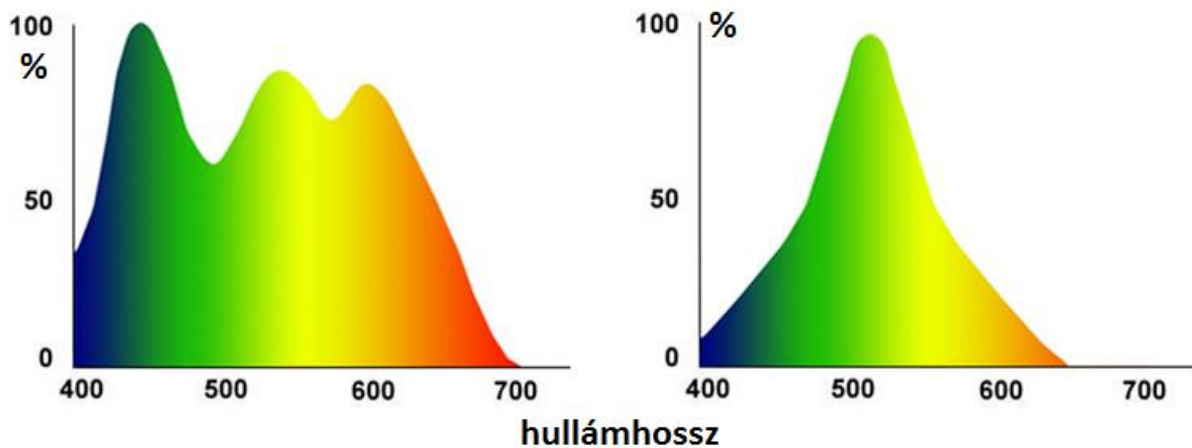
A fénynek, éppen úgy, mint a hangnak, létezik spektrális felbontása. Fehér fénye egyedül a Napnak van, ebben minden komponens nagyjából azonos amplitúdóval vesz részt (nem véletlenül neveztük fehérnek a hasonló zajt).

Az emberi szem maximális felbontóképessége 26 szögmásodperc. A képernyők nézési távolságát is meghatározhatjuk azzal, hogy mekkora az a távolság, amelyben már a pixelek összeolvadnak és nem tudjuk őket megkülönböztetni. Ökölszabályként elmondható, hogy $119\% \cdot \text{képtáv}$ az optimális nézési távolság. Ez meglehetősen közelinek tűnhet, egy 65 collos (165 cm) képtávú televízió elég nagy képernyővel rendelkezik, ehhez kb. 2 méteres nézési távolság tartozik. ha ennél messzebb van a készülék, indokolt lehet ennél is nagyobb tévét venni.



Fénycső sugárzási teljesítményének spektrális eloszlása

A hallás tárgyalásánál már megismerkedtünk a hallásküszöb fogalmával. Megadta, hogy adott frekvenciájú hangot milyen erősen kell kiadni, hogy meghalljuk. Hasonlóan értelmezhetjük a látás küszöbfüggvényét, vagyis frekvenciában megadott érzékenységet. Az alábbi ábra az átlagos emberi szem szabványosított spektrális érzékenységet mutatja.



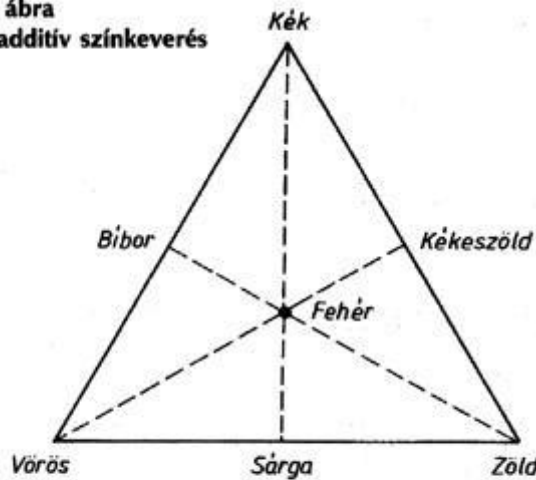
Az átlagos emberi szem spektrális érzékenysége. Balra a három csúcs jelzi a három ún. látóbíbor érzékenységi maximumát, jobbra az összesített, átlagolt érzékenység görbéje.

4.1 Színmérés

Izokróm színingernek nevezzük azt az esetet, amikor bizonyos színek és azok keveréke azonos körülmények között azonos színérzetet keltenek. Ez a színkeverés alapja. Ehhez nem kell azonos spektrumúnak lenniük. Bár több alapszín is kiválasztható lenne, a korabeli technikai megoldások az RGB alapszíneket határozták meg. Ezek keverékéből majdnem minden szín kikeverhető. Az RGB alapszínek hullámhosszát is szabványosították:

- R = 700 nm
- G = 564,1 nm
- B = 435,8 nm

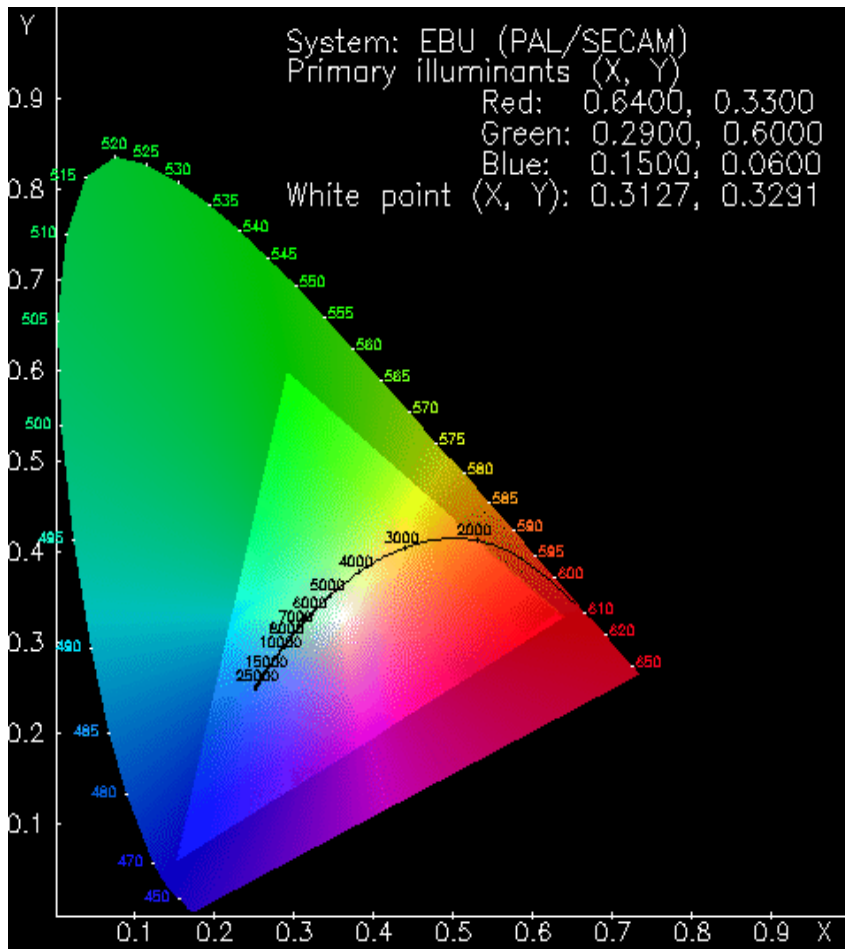
1.6. ábra
Az additív színkeverés



$$\begin{aligned}R + G &= \text{Sárga} \\R + B &= \text{Bibor} \\G + B &= \text{Kékeszöld} \\R + G + B &= \text{Fehér}\end{aligned}$$

Additív színkeverés

Az RGB technika megfelel klasszikus háromdimenziós koordináta-geometriának, amelyben számításokat végezhetünk. Mivel 3D térvektorokról van szó, amelyek 2D-ben a papíron nehezen ábrázolhatók, elvégeztek többfajta transzformációt, hogy a színteret 2D-ben lehessen látványosan és hasznosan ábrázolni. Ezek leghíresebbike a színpatkó. Ez az összes látható szín tartományát egy olyan 2D ábrába sűríti, amelynek szélén található a spektrálszínek (a frekvenciatengely), belül pedig a fehér és a fekete egy pontban. Az ábrán láthatjuk a patkóba berajzolt háromszöget, ez a tévé által visszaadható színek tartománya. A háromszög (ill. a patkó) szélén található a színezet információ (milyen színű valami). A telítettség információt úgy kapjuk meg, hogy az adott pontot összekötjük a fehérrel és a spektrálszínnel, majd megadjuk, milyen arányban osztja fel az ezt az egyenest. Ne feledjük, a telítettség azt mondja meg, mennyire van feltöltve fehérrel az adott szín (a világos zöld és a sötét zöld ugyanolyan színű, de eltérő telítettségű).

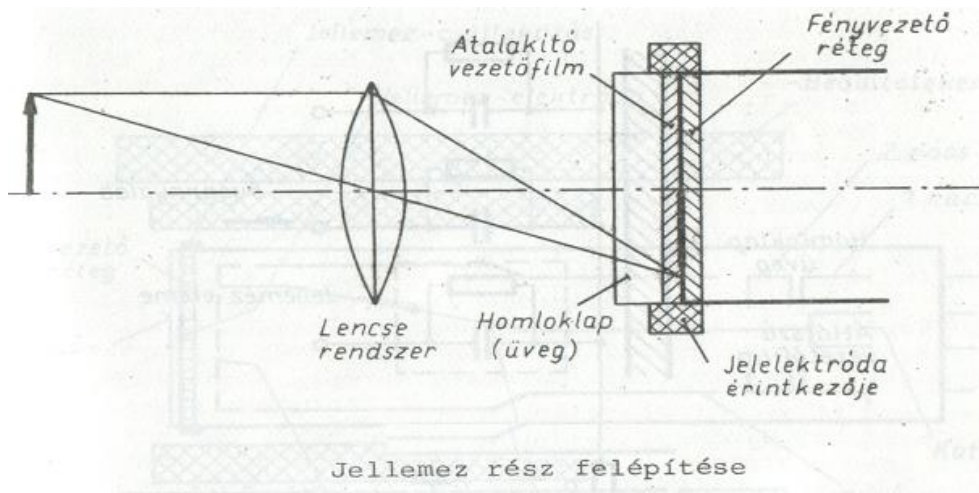


A színháromszög és színpatkó.

A helyes színvisszaadás elve szerint nem a valóság-hű reprodukciót tekintjük „jónak”, hanem azt a képet, amelyet akkor látnánk, ha fehér fényel világítanánk meg. A fehér fény (nappali) változik az idővel, időjárással, a mesterséges megvilágítás pedig sárga, és nem fehér. A helyes színvisszaadás ebből a szempontból nem valóság-hűséget jelent. Megoldás: olyan színszűrő kell a fényforrás elé, amely annak spektrumát „fehér fényé” teszi. A fényforrás helyett a kamera elé is lehet tenni, ami egyszerűbb, és elektronikusan is megvalósítható. Ez a fehéregyensúly-beállítás.

4.2 Képfelvevő eszközök

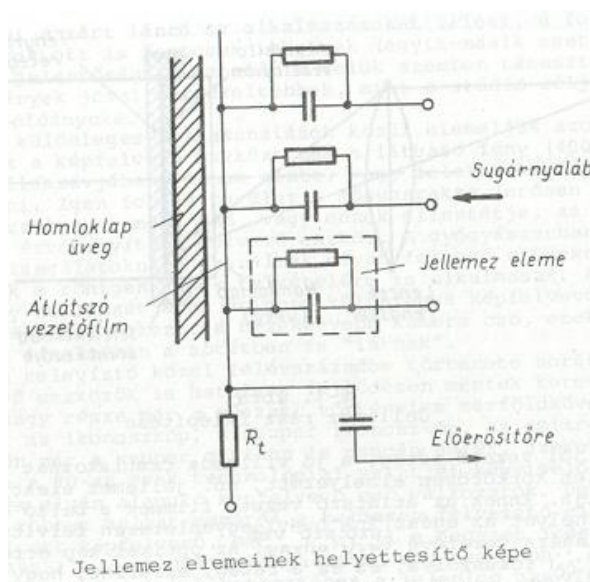
A legalapvetőbb képfelvevő eszköz a katódsugárcsöves (CRT) kamera volt. Alapesetben ez fekete-fehér képet állít elő. A színes kamerák ennek továbbfejlesztett változatai, három egyforma ff-képfelvevő csőből és színszűrőkből állnak. A lencserendszeren átjutott fényt egy prizmával három részre osztják és azokat egyenként egy vörös, kék és zöld színszűrőn vezetik át.



A képfelvevő metszete.

A kép egy lencserendszeren át jut a fényérzékeny rétegre. Ez a réteg pixelenként tapogatja le a képet és így a kétdimenziós információt a videójel formájában sorossá alakítja (soronkénti letapogatás). A fényvezető réteg minden pixele egy fényérzékeny ellenállással modellezhető: a beeső fény függvényében változtatja vezetőképességét. Egy-egy pixel, egy ilyen ellenállás és egy vele párhuzamosan kapcsolt kondenzátorral modellezhető.

Ha a kép sötét, elvileg nincs videójel. A pásztázó elektronsugár feladata, hogy a kondenzátorokat feltöltse. Sötétben is van veszteség, ilyenkor ezt kell pótolni (sötétáram). Ha fény mennyiség ér egy pixelt, az ellenállás ennek függvényében egyre jobban vezetni kezd és kisüt a kondenzátort. Az elektronsugár aztán ezt ismét feltölti. Az így kilépő áram a videójel.



A pixelek modellezése.

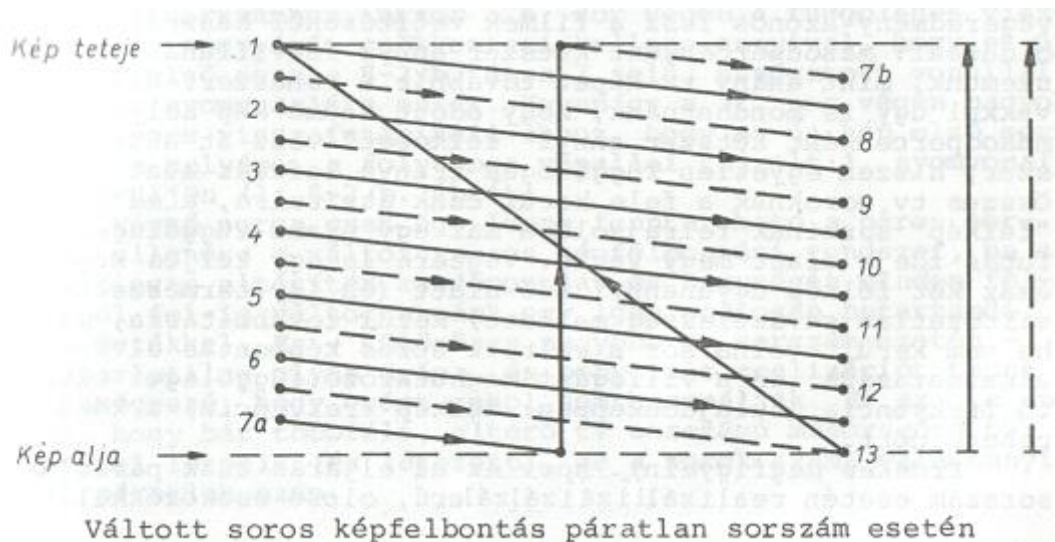
Az elektronsugár mágneses mezővel került eltérítésre a függőleges és a vízszintes irányban is. Ha a megjelenítő egység katódsugárcsőves (régie tévé), a folyamat ellentétesen zajlik. Ilyenkor speciális fényport kell felvinni az üveg belső oldalára, amely feszültség hatására, avval arányosan, világítani kezd. Színes kép esetén három elektrónagyúra és háromféle (RGB) színporra van szükség. Elég kicsi pixelek esetén a három fénypont a szemünkben egy színes képponttá keverődik ki. A kontraszt növelésének érdekében a szép képhez sötétre van szükség.

A korábban modernnek számító készülékek ezért „black matrix” eljárással a pixelek közötti rést feketére festették.

A modern képfelvevők 3CCD csipet tartalmazó lapokból állnak, amelyek órajel ütemben érzékelik a fényt, és kerülnek kiolvasásra. A legmodernebb megjelenítők folyadékkristályos (LCD, LED) vagy korábban plazma elven működnek. Előnyük a kisebb helyfoglalás (ugyanakkora képméret mellett), a nagyobb kontraszt és szintisztaság.

4.3 Tévékép és műsorszórás

A fekete-fehér kép sávszélesség igénye nagyjából 6 MHz. Ilyen nagyfrekvenciás komponensek ritkán fordulnak elő a jelben, így gyakorlatban már 3-4 MHz is elegendő. Analóg tévé esetén a számításokat 25 kép/mp átvitelre tervezték, de láttuk, hogy ennek duplájára van szükség. Ez a sávszélességet is duplázná, ez pedig nem fért bele az akkori csatornakiosztásba. A megoldás az lett, hogy ún. váltott soros (interlace) megjelenítésre tértek át. Ilyenkor egy kép két félképre lesz bontva: az egyik a páratlan, a másik a páros sorokból áll, és a szemünk végzi az „összefésülést”. A szemünk így 50 félkép felvillanását látja, ami elégséges. Természetesen, ezáltal a függőleges felbontás a felére esik.



Az európai (PAL) szabvány 625 sort használt, ebből 575 aktív, 25 nem kerül megjelenítésre. A videójelben a sorokat és a félképeket is szinkronjelekkel kell ellátni. Az adóból kisugárzott jel AM-VSB modulációt kap (csonka oldalsávú AM, lásd később).

Színes tévéátvitelhez a ff kompatibilitást meg kellett tartani. Úgy kellett a színinformációt elhelyezni a ff képen, hogy az a ff készüléket minimálisan zavarja. Ráadásul, olyan moduláció kellett, ami egy vivővel képes két független információt átvinni. Erre alkalmas az analóg QAM moduláció: az NTSC és a PAL is ezt használja.

Átvitelre ilyenkor az Y (világosság) és két ún. színkülönbségi jel kerül (az R-Y és a B-Y). Ebből a három adatból ugyanis a negyedik kiszámítható, valamint a ténylegesen szükséges RGB értékek is. A készülékeknek ugyanis RGB értékekre van szükségük, de ha ezt vinnék át, akkor a ff tévék nem tudnák kezelni! Ezért szétválasztották az információt pusztán világosság jelre (Y) és tisztán színjelekre. A szükséges egyenlet: $Y=0,3R+0,59G+0,11B$. Tehát minden pixelnek van egy világosságértéke, amit az őt alkotó RGB koordináták az alábbi módon súlyoznak.

Az NTSC rendszer több megfontolás alapján 3,58 MHz-re választotta az ún. színsegédvívöt. Ezt modulálják meg a QAM modulátorral, amelynek a két szinkülönbségi jel a moduláló tényezője (nem egészen pontosan). PAL esetében azonban igen, de itt a frekvencia 4,43 MHz. A PAL rendszer előnye, hogy az esetleges fázishibát az NTSC-vel ellentétben nem színhelyesség, hanem csak telítettség hibaként jeleníti meg. A dekódoláshoz mindkét esetben szükség van a fázishelyes vivőre (burst jel).

Digitális televíziózásban (DVB) az analóg világ nehézségeit elhagyták, és kezdetben MPEG2, mára MPEG4 adatfolyamokat fognak össze ún. multiplexbe, és azokat digitális modulációval juttatják el a vevőbe. A képminőség javul, HDTV esetén akár 720 sor is rendelkezésre áll, emellé sokcsatornás digitális hang, elektronikus műsorújság és számtalan kényelmi funkció. A készülékek (okostévék) a digitális tévéadások mellett rádióadásokat is fognak, internetes csatlakozással is rendelkeznek, USB bementeken külső eszközöket kezelnek.

4.4 A rádiócsatorna

A rádiócsatorna frekvenciasávokra van osztva. Egyrészt, mert a különböző frekvenciájú jelek eltérően viselkednek (így felhasználhatóságuk is változik), másrészt a frekvencia drága, és szabályozni kell annak hozzáférését.

megnevezése	hullámhossztartománya	frekvenci tartománya	adásmód	alkalmazás
ELF - VLF	$10^8 - 10^4$ m	3 Hz - 30 kHz	huzalpár, hosszuhullámú rádió	hang, telefon, adatátvitel, nagytávolságú navigáció
LF	$10^4 - 10^3$ m	30 - 300kHz	huzalpár, hosszuhullámú rádió	navigáció, rádió jeledők, hang és frekvenciaetelen sugárzás
MF	1000 - 100 m	300 - 3000 kHz	koaxiális kábel, hosszuhullámú rádió	amatőr rádiózás, AM műsorszórás
HF	100 - 10 m	3 - 30 MHz	koaxiális kábel, rövidhullámú rádió	amatőr rádiózás, CB (UK), katonai kommunikáció, mobil rádiótelefon
VHF	10 - 1 m	30 - 300 MHz	koaxiális kábel, rövidhullámú rádió	FM rádió, navigáció, VHF televízió
UHF	100 - 10 cm	300 - 3000 MHz	rövidhullámú rádió, hullámvezető	CB rádió, kommunikáció (katonai), rádió, UHF televízió
SHF	10 - 1 cm	3 - 30 GHz	mikrohullámú rádió, hullámvezető	mikrohullámú összeköttetés, radar, kommunikáció (űrkutatás)
EHF	10 - 1 mm	30 - 300 GHz	mikrohullámú rádió, hullámvezető	mikrohullámú összeköttetés, radar, kommunikáció (űrkutatás)
infravörös, látható fény, ultraibolya	$3 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-6}$ cm	$10^{14} - 10^{16}$ Hz	lézer, optikai szál	adatátvitel

Az alábbi sávok mutatják, mire tudjuk használni őket:

- 3-300 kHz: navigáció, szonár
- 300-3000 kHz: AM műsorszórás, tengeri rádiózás
- 3-30 MHz: RH rádió, amatőr rádiók

- 30-300 MHz: TV és FM rádió, légiirányítás
- 300-3000 MHz: TV, műholdas összeköttetések
- 3-30 GHz: radar, mikrohullám, mobil rádió, műhold
- 30-300 GHz: radar, kísérleti célok

A frekvenciasávokat Magyarországon az NMHH kezeli, értékesíti, szabályozza. Előfordulhat, hogy bizonyos sávokat felszabadítanak, másokat megnyitnak. 2020-ban a 700 MHz-es sávban működő DVB-T adókat helyezték át, hogy helyet biztosítsanak az 5G hálózatoknak.

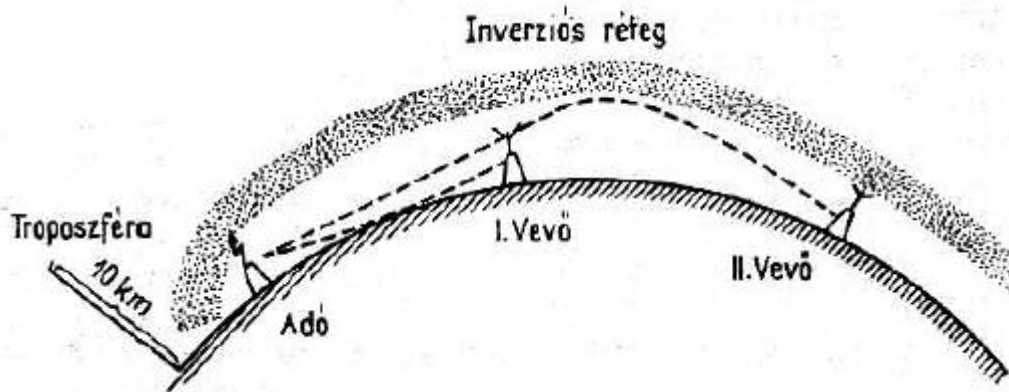
4.5 Hullámterjedés

A hullámok terjedése alapvető jelentőségű a távközlésben. Ez határozza meg, milyen messzire, mekkora teljesítménnyel és miféle jeleket tudunk kisugározni. A legismertebb terjedési forma a *közvetlen (direkt)* hullámterjedés. Jellemzője az akadálymentes ún. szabadtéri terjedés, amely elméletben síkhullámú terjedés. A matematikája egyszerű, pl. a teljesítménysűrűség az antennától r -távolságra arányos $P_{be}/4\pi r^2$ -el. A szabadtéri csillapítás ebben az esetben megegyezik a rádiócsatorna csillapításával. A *refrakció* magyar elnevezése a „törés”. Ha a hullám közeget határra érkezik, egy része visszaverődik, másik része megtörve behatol a közegbe. A *reflexió* leggyakoribb megjelenése a talajról ill. tereptárgyokról történő visszaverődéskor van. Kis beesési szög (5 foknál kisebb) a talajreflexió tényező -1 , polarizációtól és frekvenciától függetlenül. Jelentősége nagyon nagy, mert ez az ún. többutas terjedés legalapvetőbb oka (lásd később). Ennek is legegyszerűbb esete a sík föld feletti kétutas terjedés, amelyet az URH és mobil rendszerek használnak ki. A reflektált hullám nem más, mint a direkt hullám késleltetett és csillapított verziója. A *diffrakció* magyar elnevezése az elhajlás vagy néha az árnyékbehatolás is lehetne. Akkor lép fel, ha a hullám hullámhossza összemérhető az akadállyal vagy réssel, amivel találkozik (akár egy rés, akár két rés, akár rács kerül az útjába). Kis rés esetén (Huygens-Fresnel elv) olyan térrészbe is jut jel, amely árnyékban van. Elvben az árnyékban lévő antennára nem jut jel, ha nem látszik (hiányzik az ún. optikai rálátás). A valóságban azonban valamennyire behatolnak az árnyékba is a hullámok. Ilyenkor szóródási effektusok (diszperzió) lépnek fel. Diszperzió akkor van jelen, ha a közeg törésmutatója hullámhossz-függő. A prizma kétszer tör meg és hatol át a fényhullám, és eltérő utakat futnak be a különböző színek, így a fehér fénysugár a szivárvány színeire bomolva szétterül (szórodik a fény).

A levegő változó törésmutatója okán, a hullám a sűrűbb közeg felé hajlik el. Ez az elhajlás nagyjából exponenciális jelleggel a föld felé történik.

A rádiós összeköttetés gyakran kihasználja a Föld és a levegőrétegek tulajdonságait. A *felületi hullámok* a jól vezető Föld és levegő határán alakulnak ki a talaj közelében. A hullámhosszhoz képest alacsony antenna kell a vételhez. A talaj a kHz-MHz tartományban vezet jól, így itt ez az elsődleges terjedési mód. Az elérhető távolság néhány száz km, és csak vertikális polarizáció (horizontálisra túl nagy a csillapítás) használható. A hullámok a talaj görbületét követve haladnak és messze eljuthatnak.

A *troposzféra* 200 MHz – 10 GHz tartományban befolyásolja a terjedést és okoz jelentős vételi térerősségingadozást. Nagy adóteljesítmény esetén a levegő helyi hőmérséklet- és nyomásváltozása erős szórt teljesítményt okozhat (amit kihasználunk, elsősorban URH-on). Kb. 10-11 km magasan alakulnak ki a szóródások, amik lehetővé teszik az összeköttetést. A troposzféra felett van a sztratoszféra kb. 40-80 km magasságig.

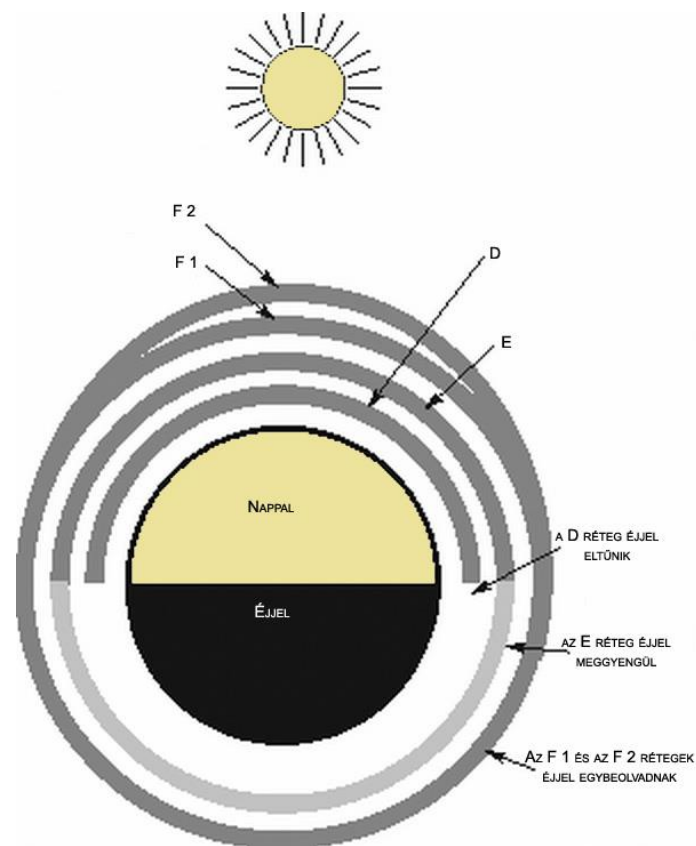
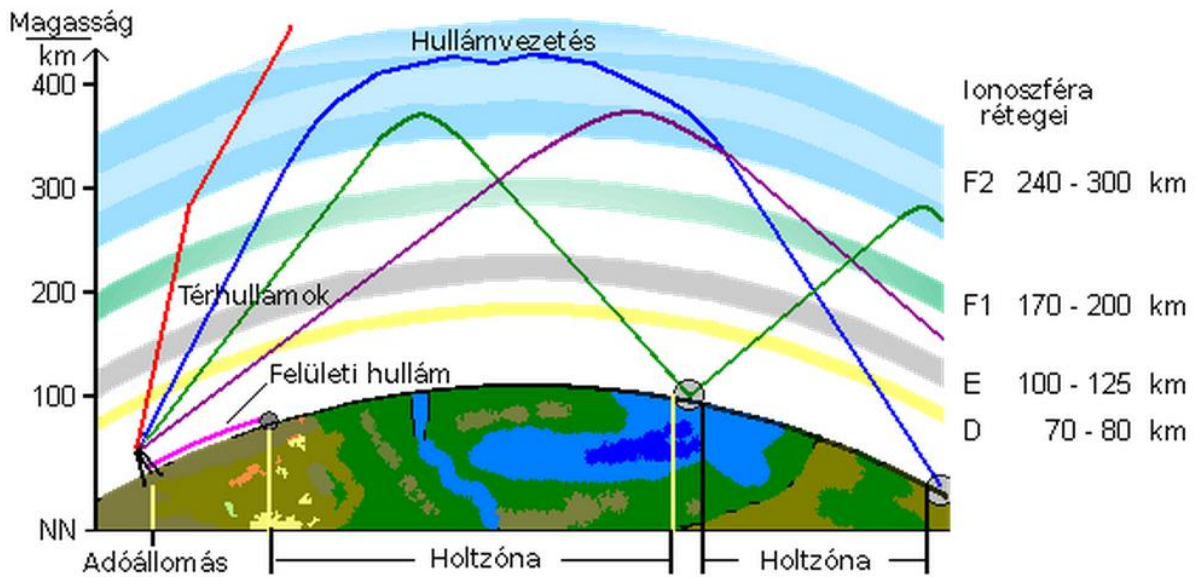


Troposzférikus terjedés során kialakuló inverziós réteg, mely a hullámokat reflektálja.

Az *ionoszféra* a sztratoszféra felett kezdődik 80-100 km magasságnál. Itt ionizált részecskék jönnek létre a Nap és kozmikus sugárzás hatására, amelyek vezetővé válnak és képesek a hullámokat visszaverni. Bizonyos rétegeinek hatása nappal erős, éjjel megszűnik. A D-réteg, 40-80 km magasságban csak nappal létezik, inkább elnyeli a hullámokat. Felette az E-réteg napfelkelte előtt keletkezik, részben éjjel is megmarad, 100-160 km között. Az alacsonyabb frekvenciákat ez reflektálja. 180-400 km között van az F-réteg, amely szintén két alrészből áll, de csak nappal. Éjjel az alsó rétege eltűnik, és erősen befolyásolja a RH terjedést.

Az a frekvencia, ahol adott frekvenciájú hullám 0,5 valószínűséggel visszaverődik (ill. áthalad) *határfrekvenciának* vagy *kritikus frekvenciának* nevezzük, merőleges beesés esetén. A valóságban a fellövési szög ferde, ekkor a kritikusnál nagyobb frekvenciák is visszaverődhetnek. A *kritikus fellövési szög*, amelynél kisebb szögek esetén, adott frekvencián még van visszaverődés. Ha a frekvencia nő, a kritikus szög csökken: létezik egy ún. Maximum Usable Frequency. Létezik alsó határfrekvencia is, amit a rétegben keletkező veszteségek határoznak meg. A holt zónában, ahol nincs vétel. Ha ferdeszögű a beesés, akkor a határfrekvenciánál nagyobb frekvenciák is visszaverődnek ($f/\sin \alpha$). A rétegek tulajdonságát a naptevékenység befolyásolja.

Összességében tehát háromféle módon juthat az adóból a vevőbe a jel: közvetlen terjedés, felületi hullám, ill. a légkörről visszaverődő térhullám formájában. RH esetében a leginkább a rálátás és a közvetlen terjedés dominál. Ezért fontos a térhullámok kialakulása, ezzel növelhető a vételkörzet. Az ionoszféra nagyjából 4-14 MHz között veri vissza a hullámokat, de ez erősen függ az évszaktól, napszaktól és a beesési szögtől is. KH és HH esetén a legfontosabb a felületi hullámterjedés.



Az ionosféra állapota

Rádióvételkor az adóantenna kisugározza a jelet, melyet a vevőantenna érzékel. A kisugárzott jel modulált jel (lásd következő fejezet) és közel fénysebességgel terjed. A vevőantenna, mint fém tárgy, az elektromágneses tér erőbe kerülve indukált feszültséget hoz létre. Ez egy nyílt rezgőkör, mely maximális kimenőfeszültséget a rezonanciafrekvenciáján ad. Ez a rádiófrekvenciás (RF) jelűt. Egy antenna egyszerre több jelet, több adó modulált jelét is veszi.

Így a vevőkészülék feladata, hogy ebből egyet kiválasszon és a demodulátor számára egy jelet behangoljon. Ehhez minden adónak (adásnak) különböző vivőfrekvenciát kell alkalmaznia.

Megnevezés	Jelölés	Frekvencia	Hullámhossz
Hosszúhullámok	LF	30...300 kHz	10...1 km
Középhullámok	MF	300 kHz... 3 MHz	1000... 100m
Rövidhullámok	HF	3...30 MHz	100... 10m
Ultrarövidhullámok	VHF	30...300 MHz	10... 1m
Deciméteres hullámok	UHF	300...3000 MHz	1...0,1m

- Hosszúhullám: 150 kHz – 285 kHz (2000-1050 m)
 - AM, DRM
 - Csatornaszélesség: jellemzően 9kHz
- Középhullám: 520 kHz – 1605 kHz (590-187 m)
 - AM, DRM
 - Csatornaszélesség: jellemzően 9kHz
- Rövidhullám: 3,95 MHz – 26,1 MHz (76-11,5 m)
 - műsorszórásra használatosak a 11, 13, 16, 19, 21, 25, 31, 41, 49, 60, 75, 90, 120 m-es sávok
 - AM, DRM
 - Csatornaszélesség: jellemzően 9kHz
- Ultrarövid hullám: 87,5 -108 MHz (3,4m – 2,7m)
 - WBFM
 - Csatornaszélesség: 300kHz
- 174 - 235 MHz (VHF III)
 - DAB, DAB+
- 1452 - 1479,5 MHz (L-sáv)
 - DAB, DAB+

A rádiózás hullámsávjai.

A rádiózás népszerűsége folyamatosan csökken. Egy 2021-es ezerfős reprezentatív felmérés szerint az aktív nethasználók harmada rendszeresen hallgat tematikus podcastokat, amely egyfajta offline beszélgetős rádiós műsornak is felfogható. Ugyanakkor negyven százalékuk nem tudatos hallgató, hanem „belebotlik” valami érdekes témába, sokszor nem is tudják mi a címe vagy elérhetősége a podcastnak. Ez egyben jelzi a rádiózásról való leszokást, másrészt a nem kiforrott új hallgató szokásokat. Online rádióadást a válaszadók kétharmada szokott hallgatni (17% naponta), leginkább telefonon, amely még mindig kellően magas arány. Többségük olyan adást hallgat online, amely a műsorszórásban (azaz nem csak online) is elérhető. Esetükben sokkal tudatosabb a választás, hogy melyik adót kapcsolják be.

- VHF I: 48,5 - 66 MHz
 - Analóg TV
 - Csatornaszélesség: 8MHz
- VHF III: 174 - 230 MHz
 - Analóg TV, DVB-T, (DAB)
 - Csatornaszélesség: 8MHz
- UHF: 470 - 862 MHz (Változik!!!)
 - Analóg TV, DVB-T
 - Csatornaszélesség: 8MHz
- 11,7 .. 12,5 GHz (műholdas műsorszórás)
 - Analóg TV, DVB-S

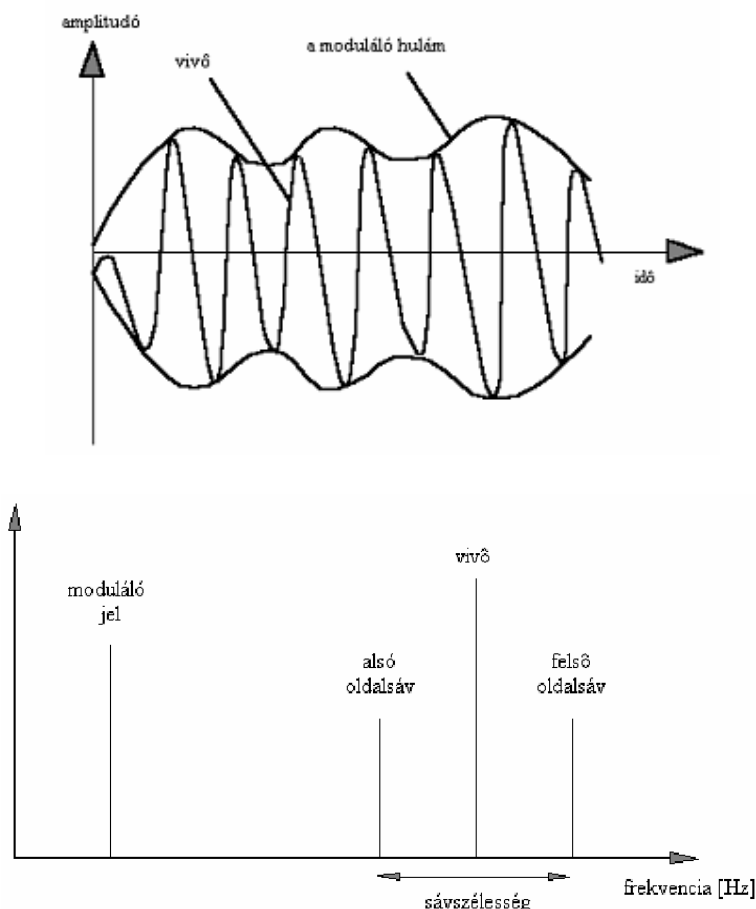
A televíziózás hullámsávjai.

5. A moduláció

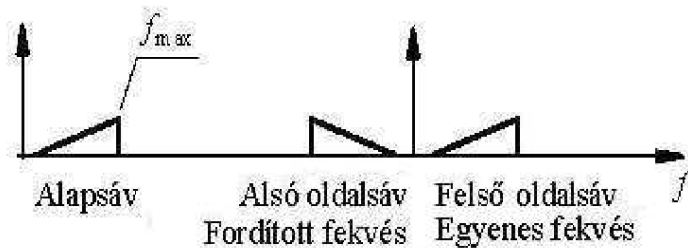
A távközlés legalapvetőbb eszköze a moduláció. Egy (folyamatos) szinuszhullám nem hordoz információt, noha fizikai tulajdonságai vannak (frekvencia, amplitúdó és esetleg a fázisállapot). Hogy közölhessünk vele valamit, egy információt hordozó hullámot kell ráültetnünk. Ezt a folyamatot nevezzük **modulációnak**, magát a szinuszhullámot pedig **vivőnek**. Miért van szükség a vivőre? Miért nem lehet az információt (beszédet, zenét... stb.) közvetlenül elektromos jellé alakítani? A válasz kettős. Egyrészt, ahhoz hogy az elektromágneses hullámokat megfelelő hatásokkal sugározhassuk, az adásra használt antenna mérete a hullámhossz felénél nem lehet rövidebb. A hangfrekvencia tartományába eső hullámok hullámhossza sok kilométer. Másrészt, ha minden adó ugyanazon a frekvencián sugározna, az eredmény az lenne, mintha több száz ember beszélne egyszerre. Tehát az egymáshoz közel levő rádióadóknak más-más **vivőfrekvenciát** kell használniuk.

A **vivő** modulációjának sok fajtája van. Hogy információt ültessünk rá, változtathatjuk a vivő A amplitúdóját vagy az f frekvenciáját, közvetlenül az átvinni kívánt információnak megfelelően. Az elsőként említett rendszert **amplitúdómodulációnak (AM)**, míg a másikat **frekvenciamodulációnak (FM)** nevezzük. Jegyezzük meg, hogy létezik fázismoduláció (PM) is, amely a frekvenciamoduláció egyik speciális este, hiszen a fázisváltozás és a frekvenciaváltozás egymással derivált kapcsolatban áll. Analóg fázismodulációt ritkán alkalmazunk, digitális esetben azonban nagyon is gyakran.

5.1 Amplitúdómoduláció (AM)



AM moduláció az idő- és a frekvenciatartományban szinuszos moduláló jel esetén.

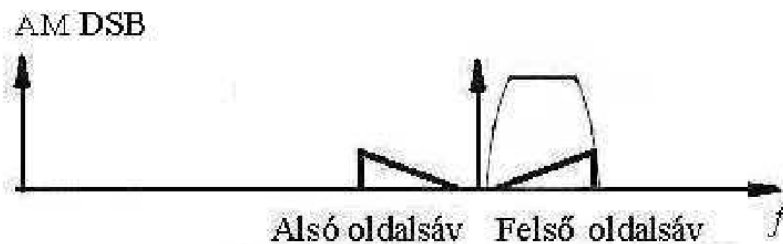


AM jel felső- és alsó oldalsávval: a modulált jel sávzélessége kétszerese az alapsávi jelnek.

Az AM moduláció hatására a moduláló jel (más néven alapsávi jel) spektruma megjelenik a vivőfrekvencia környezetében, normál esetben annak két oldalán. Ha a moduláló jel egy másik szinuszhullám, akkor a két ún. oldalsáv egy-egy vonalból fog állni. Ha a moduláló jel pl. zene, akkor annak megfelelő sávzélességet fog ott elfoglalni: az alapsávi jel kétszeresét. Az ezt jelképező háromszöget úgy szoktuk lerajzolni, hogy az a nagyobb frekvenciák felé növekszik. Így jól látható, hogy a moduláció során az alsó oldalsáv „megfordul”, ugyanis mindig a kisfrekvenciák találhatók a vivőhöz közelebb.

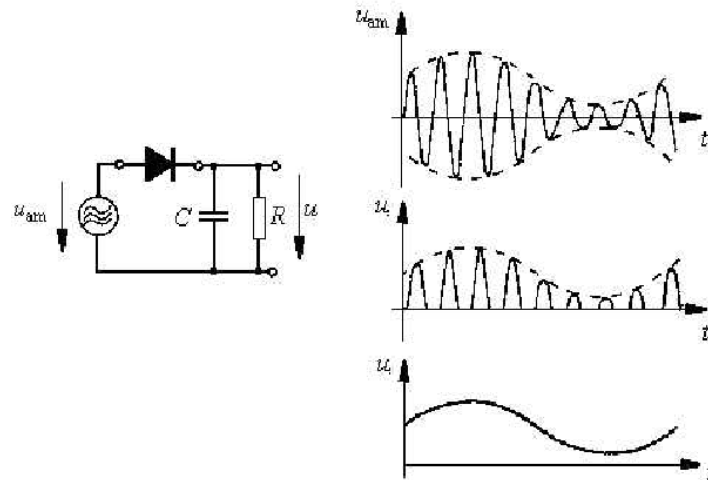
Látható, hogy ez a kétoldalsáv (AM-DSB) fajta pazarló: ugyanaz az információ kétszer található meg benne. Mivel az amplitúdómoduláció során két oldalsáv lép fel, s mindegyik egyaránt tartalmazza az f_m moduláló frekvenciát, nincs szükség arra, hogy mindkét oldalsávot elküldjünk. Ráadásul, maga a kisugárzott vivő semmiféle információt nem hordoz, azt el is nyomhatjuk, kiszűrhetjük. HH, KH és RH rádiók az AM-DSB-t alkalmazzák a könnyű demoduláció érdekében. A féloldalsáv, vagy AM-SSB technikában csak az egyik, vagy az alsót (LSB), vagy csak a felső (USB) sávot sugározzák ki, míg a másikat, sőt, még magát a vivőt is elnyomják (SC = Supressed Carrier). Az SSB technika dupla előnnyel rendelkezik:

- Mivel csak az egyik oldalsávot sugározzuk, a másikat felhasználhatjuk más információ küldésére. Ezáltal az átviteli csatornák számát megkétszereztük.
- Az összes rendelkezésre álló adóenergiát egy oldalsávba koncentráltuk, s nem osztottuk szét a két oldalsáv és a vivő között. Így jelentősen megnövelhetjük az adás hatótávolságát, vagy azonos távolságra való küldéshez lényegesen kevesebb energiát kell felhasználnunk.



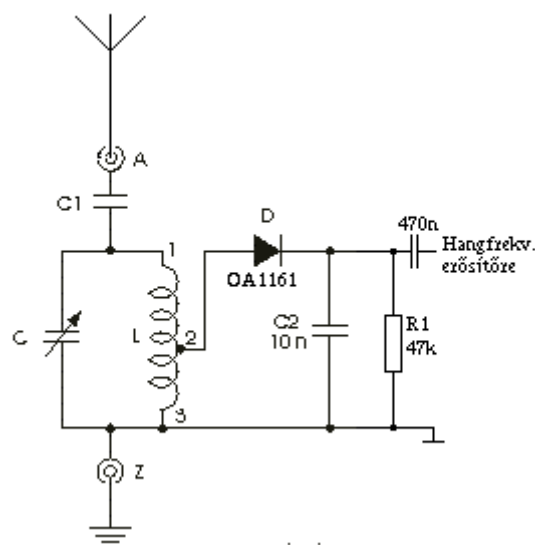
AM-DSB-ből nyert AM-SSB/SC jel szűréssel.

Az AM demodulációja rendkívül egyszerű, és sokféle demodulátor létezik. A legegyszerűbb az ún. diódás burkolódetektor, ami egy diódából és ellenállásból, netán kondenzátorból áll (a hangolás miatt). Hátránya, hogy könnyen torzítás léphet fel.



Burkolódetektoros, diódás demodulátor.

Az ábrán látható demodulátorban egy kondenzátor található. Ha ez nem lenne benne, a dióda bemenetére adott AM-DSB jel pozitív félperiódusában nyitna, és a kimeneten a dióda nyitófeszültségével csökkentett bemenő feszültség jelenne meg; míg a negatív félperiódusban a dióda zár (ez látható a középső ábrán). A kondenzátor azonban a dióda nyitott állapotában feltöltődik, és amennyiben az RC időállandó helyesen van beállítva a dióda lezárt állapotában részben kisül. Így az u kimenő feszültség jó közelítéssel a burkolót fogja közelíteni. Ha az ellenállás túl nagy, akkor a kondenzátor nem tud kisülni, ha túl kicsi, akkor pedig túl hamar sül ki. A túl nagy kondenzátor megtartja a feltöltött feszültségét és nem követi a modulációt, a túl kicsi pedig idő előtt túl sok potenciált veszít. Az ilyen vevőt szokás még kristálydetektoros vevőnek is nevezni. A vevőnek nem csak a demodulátor a része, hanem az antenna és a kettő közé illesztett hangolható rezgőkör is. Ezt a Thomson-képlettel állíthatjuk be a venni kívánt vivő frekvenciájára.



Kristálydetektoros vevő hangolható rezgőkörrel.

Manapság a modulációt és a demodulációt is szorzó áramkörrel és egy aluláteresztő szűrővel végzik. Ennek megértéséhez nézzünk egy egyszerű példát, amikor a szinuszos vivőt egy egyszerű tiszta szinuszos moduláló jellel modulálunk. Ennek eredménye, hogy a szinuszos vivő amplitúdója a moduláló jel frekvenciájának ütemében ingadozik. Ekkor a vivő egyenlete:

$$X_v = A_v \sin(\omega_v t)$$

ahol a v -index a vivőt jelenti. Hasonlóan, a moduláló jel egyenlete:

$$X_m = A_m \sin(\omega_m t).$$

Ezt a kettőt összeszorozva, és felhasználva, hogy $\sin(x) \cdot \sin(y) = (1/2)(\cos(x-y) - \cos(x+y))$ az alábbi kapjuk a szorzatra:

$$Z = A_v A_m \sin(\omega_v t) \sin(\omega_m t) = (A_v A_m / 2) * (\cos(\omega_v t - \omega_m t) - \cos(\omega_v t + \omega_m t)).$$

Látható, hogy az AM jel a vivőn kívül tartalmaz két oldalsávot: a vivő felett és alatt ω_m távolságra. A \sin és a \cos között ebben a megközelítésben nincs különbség, hiszen azonos frekvencia mellett ezek egymáshoz képest csak az időben vannak eltolva. Ha például a moduláló jelet és a vivőt is koszinuszos alakban írjuk fel, az alábbi kapjuk:

$$X_v = A_v \cos(\omega_v t)$$

$$X_m = A_m \cos(\omega_m t).$$

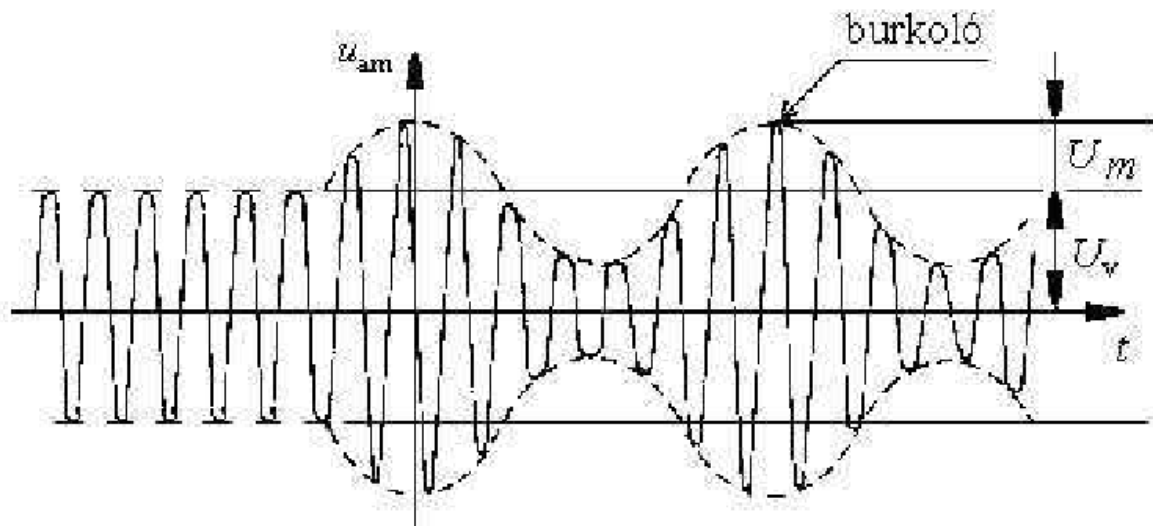
Továbbá, mivel $\cos(x) \cdot \cos(y) = (1/2)(\cos(x+y) + \cos(x-y))$, ezért:

$$Z = A_v A_m \cos(\omega_v t) \cos(\omega_m t) = (A_v A_m / 2) * (\cos(\omega_v t + \omega_m t) + \cos(\omega_v t - \omega_m t)).$$

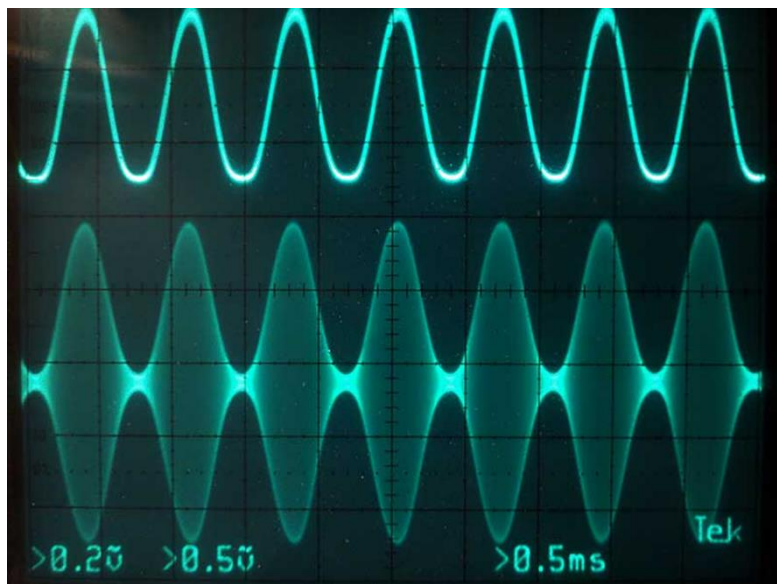
Látható, hogy a két végeredmény ugyanazokat a frekvenciájú komponenseket adják. A vivőt úgy láthatjuk meg, ha az AM jelet az alábbi alakban is felírjuk:

$$Z = (A_v + A_m \sin(\omega_m t)) \sin(\omega_v t)$$

ahol a zárójeles rész éppen a megmodulált amplitúdót mutatja. Ez a moduláló jel és az eredeti amplitúdó összege. Modulációs mélységnek nevezzük a moduláló és a vivő jel csúcserkének hányadosát: $m = A_m / A_v$



A modulációs mélység szemléltetése



Oscilloszkópos kép AM modulált jelről.

Demoduláláskor ezt a jelet kell megszorozni ismételten a vivővel:

$$\text{Demodulált jel} = Z * X_v.$$

Egyszerűen úgy közelíthetjük meg a demoduláció egyenletét, hogy az nem más, mint a moduláló jel (az adó oldalon) megszorozva a vivővel (ez lesz a modulált jel), végül újra megszorozva a vivővel a vevőnél. Így a moduláló jel összességében kétszer is megszorozásra kerül a vivővel, vagyis $\cos^2(\omega_v t)$ -el. Azt tudjuk, hogy $\cos^2(x) = (1/2)(1 + \cos(2x))$. Ezek után az alábbi egyenletet írhatjuk fel:

$$X_m \cos^2(\omega_v t) = (X_m/2)(1 + \cos(2\omega_v t)) = (X_m/2) + (X_m/2)\cos(2\omega_v t).$$

Ez volna a demodulált jel. Ez tartalmaz két összetevőt: az $X_m/2$, a hasznos jel, hiszen ez pont a keresett moduláló jel fele amplitúdóval. A másik tag a moduláló jel eltolt „felkevert” változata,

még hozzá a $2\omega_v$ frekvenciára. Vegyük észre, hogy ebből a jelből egy egyszerű aluláteresztő szűrővel az első tagot kinyerhetjük, a másodikat pedig eldobjuk.

Ezzel a módszerrel az a baj, hogy a vevőben mindig szükséges az ún. *koherens vivő*, vagyis a vivő jel *fázishelyes* változata. Ez nagyon lényeges! A vevőben lévő vivő, amivel a szorzást végezzük, pontosan azonos fázisban kell legyen az adó oldali moduláláskor meglévővel. Ekkor lesz ugyanis a kettő szorzata ténylegesen négyzetre emelés, és helyes demoduláció. Ha ugyanis nem \cos^2 -el szorzunk, hanem a két vivő között egy φ fáziskülönbség van, az alábbi számítást kapjuk:

$$X_m \cos(\omega_v t) \cos(\omega_v t + \varphi) = (X_m/2) \cos(\varphi) + (X_m/2) (1 + \cos(2\omega_v t + \varphi)).$$

Az összeg második tagja nem érdekes, úgymint kiszűrjük, de az első tag nem csupán a moduláló jelet, hanem annak $\cos(\varphi)$ -szeresét tartalmazza. Ez állandóan változó, véletlen fázis, elérheti a $\pi/2$ -t, amikor a koszinusz értéke zérus, és ekkor eltűnik a hasznos jel is.

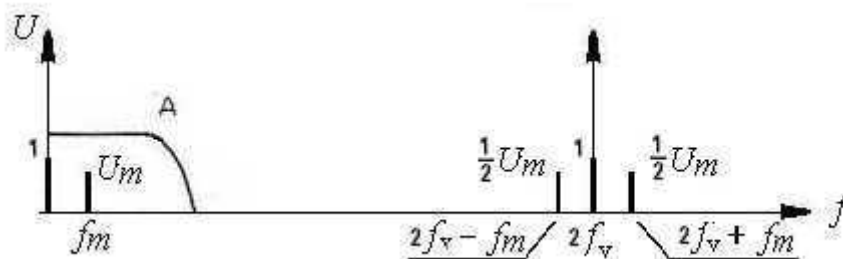
Nézzük meg mi történik a frekvenciatartományban! Ehhez a szorzásokat el fogjuk végezni, de egyszerű szinuszos moduláló jelet alkalmazunk. Láttuk már, hogy a modulált jel:

$$Z = A_v A_m \cos(\omega_v t) \cos(\omega_m t) = (A_v A_m / 2) * (\cos(\omega_v t + \omega_m t) + \cos(\omega_v t - \omega_m t)) = A_v \cos(\omega_v t) + (A_m / 2) \cos(\omega_v t + \omega_m t) + (A_m / 2) \cos(\omega_v t - \omega_m t).$$

Ezt a jelet kell beszoroznunk ismételt $A_v \cos(\omega_v t)$ -vel a vevőben:

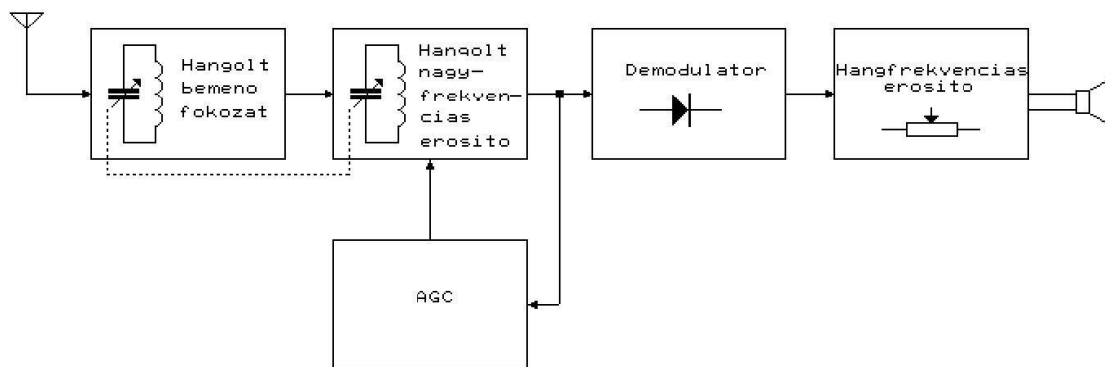
$$A_v A_v \cos^2(\omega_v t) + (A_v A_m / 2) \cos(\omega_v t + \omega_m t) \cos(\omega_v t) + (A_v A_m / 2) \cos(\omega_v t - \omega_m t) \cos(\omega_v t).$$

Az első tagból keletkezik egy DC komponens (vivő-vivő frekvencia) és egy kétszeres vivőfrekvenciájú jel. A második tagban keletkezik egy vivő+vivő+moduláló jel és egy vivő-vivő+moduláló jel komponens. Utóbbi épp a moduláló jel, amit keresünk. Hasonlóan, az utolsó tagból is keletkezik egy vivő+vivő-moduláló frekvenciájú komponens, és egy vivő-moduláló+vivő komponens. Utóbbi, mivel $\cos(-x) = \cos(+x)$, szintén a moduláló jelet adja. A végeredmény tehát szinuszos moduláló jel esetén az, hogy keletkezik egy DC tag, a hasznos moduláló jel, illetve $2v+m$, $2v-m$ és $2v$ frekvenciájú komponensek. Utóbbiakat kell a szűrővel eltávolítanunk, ahogy az ábra is mutatja.



Szorzó demoduláció a frekvenciatartományban, f_m egyfrekvenciás szinuszos moduláló jel esetén. Az *A*-szűrő feladata, hogy a DC-vel eltolt hasznos jelet elválassza a haszontalan komponensektől.

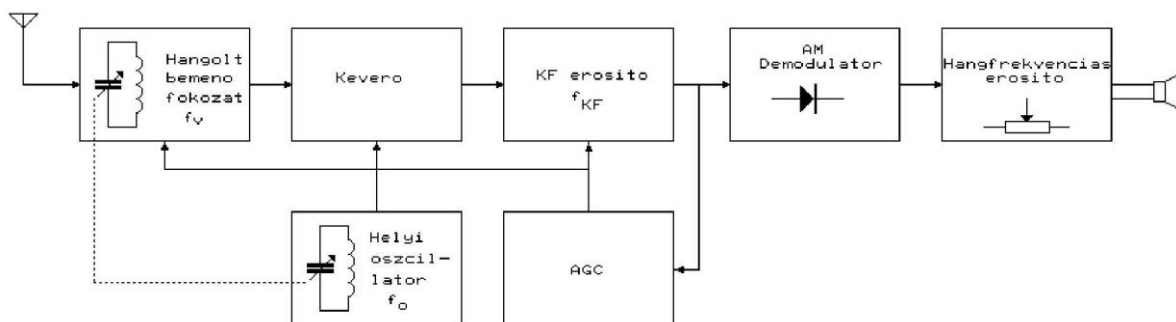
A fentiekben bemutatott vevőt „egyenes vevőnek” is nevezik. Része az antenna, a hangolható bemeneti fokozat (a tuner), egy hangolható nagyfrekvenciás erősítő, maga a demodulátor és végül a hangszórót meghajtó hangfrekvenciás erősítő.



Az egyenes vevő felépítése.

A nagyfrekvenciás erősítő feladata, hogy a bementére érkező $1\mu\text{V}$ - 1V jelet felerősítse kb. 1 V -ra. Ehhez akár 10^6 erősítésre is szükség lehet. Mivel az antenna által vett jel erőssége csatornánként is változik, ezt az erősítést állítani kell tudni. Az AGC (Automatic Gain Control) feladata, hogy a szabályozást elvégezze. Ez egyben az állandó hangerősség beállításának is tekinthető. Ezt a fokozatot is az éppen vett állomás vivőjére kell ráhangolni (összekapcsolt forgókondenzátorok). Elméletileg ezek a rezgőkörök csak a kívánt adó sávjában visznek át és erősítenek, a szomszédost maximálisan elnyomják. Sajnos, ez a valóságban nem kivitelezhető, így a szomszédos adók jele is bekerülhet zavarként a hasznos sávba. Hogy mennyire képes a vevő ezt elnyomni és kiválasztani a hasznos jelet, a vevő *szelektivitása* dönti el. Ezt a nagyfrekvenciás erősítő frekvenciamenete (átviteli függvénye) határozza meg. Ha csak egyetlen, nagy teljesítményű adót akarunk venni, az első fokozat el is maradhat. E vevő hibája, hogy a gyenge jeleknél szükséges nagy erősítési igény miatt a nagyfrekvenciás erősítő több fokozatú lehet, és minden fokozatban kell hangolható rezgőkört alkalmazni. Ilyenkor probléma lehet a közös tengelyű forgókondenzátorok együttes állítása. A kilépő kimenő vezetékek, melyek a felerősített jelet szállítják, könnyen csatolásba léphetnek és gerjedést okozhatnak, ha a bementre visszajutnak. Végül pedig, a rezgőkör sávszélessége a $B = f_v/Q$ (ahol Q a jósági tényező) az f_v vivőfrekvencia függvénye, vagyis változik a hangolással.

Kiküszöbölendő ezeket a problémákat hozták létre az ún. *szuperheterodin* vevőt. Ebben alkalmazunk egy helyi oszcillátort (HO) is, amely a beérkező f_v jelet szorzással átkeveri egy középfrekvenciára (KF). Ez hasonlóan működik, mint a szorzódemoduláció: keletkezni fog a szorzás okán egy olyan komponens, amely a f_v és a f_{HO} különbsége (ez a KF). Ez a jel követi a modulációt és ezek után ezt erősítjük. A HO frekvenciáját úgy kell együtt hangolni a bemeneti tunerrel, hogy azok különbsége mindig ugyanazt a KF-t adja ki. A módszer nagy előnye, hogy a szükséges nagy erősítést a KF-en végezzük, amely a vételi f_v -től független. Így nem változik a B sávszélesség sem és megfelelő árnyékolással a gerjedést is elkerülhetjük. A két frekvencia összegeként előálló frekvencián nincs átvitel.



Szuperheterodin vevő.

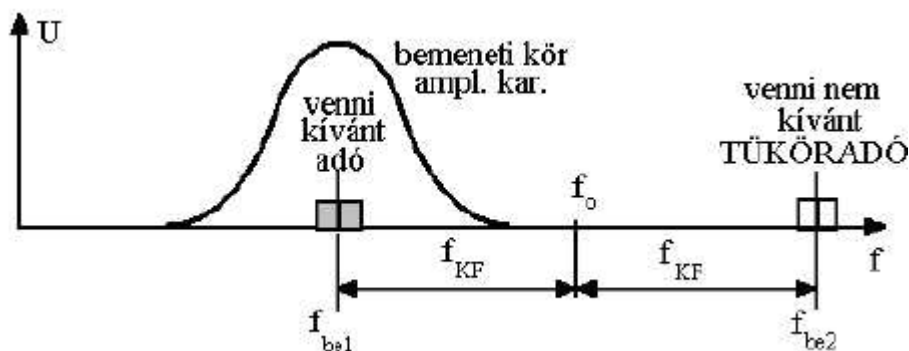
Látható, hogy ez a vevő a helyi oszcillátor f_{HO} és a venni kívánt adó f_v vivőjének különbségeként állítja elő a KF frekvenciát:

$$f_{KF} = f_{HO} - f_v.$$

Ugyanakkor ez a különbségi előáll egy másik adó f_{v2} vivőfrekvenciájából is:

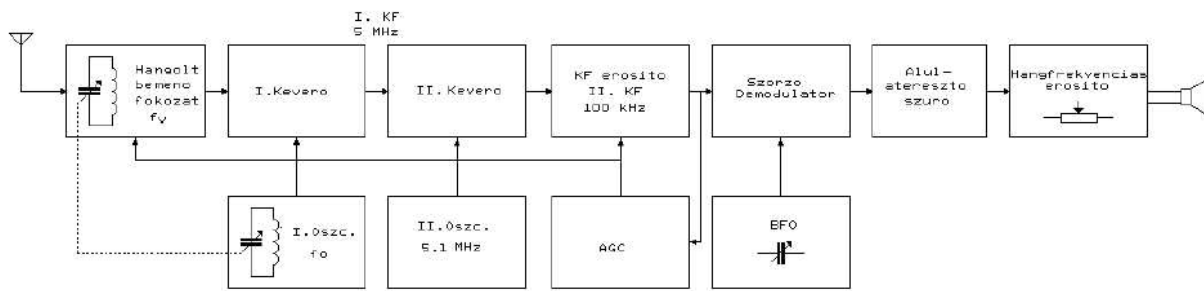
$$f_{KF} = f_{v2} - f_{HO}.$$

A másik adót, mivel az első „tükörképének” is tekinthetjük, tükörfrekvenciának nevezzük. Ezek egymástól $2KF$ távolságra vannak. A tüköradó jele természetesen nem juthat bele a keverőbe és a KF jelbe sem, hiszen akkor nem lehetne a két adót szétválasztani és összekeverednének. (Megjegyzés: a KF előáll a $f_{KF} = f_{v3} + f_{HO}$ egyenlet alapján is.) A tüköradó elnyomása a bemeneti hangolt nagyfrekvenciás erősítő fokozat feladata. A rádióvevő szomszédos adóra vonatkoztatott szétválasztási képességét szelektivitásnak neveztük, így ennek mintájára a tüköradó elnyomásának képességét *tükörszelektivitásnak*. A bemeneti szűrőnek tehát a $2KF$ -re nézve kell csillapítania, illetve olcsón elő tudunk állítani hangolható kivitelben is.



A tüköradó megjelenése és szűrése.

Ha a KF frekvencia elég nagy (ahogy az ábrán is látszik), a bemeneti rezgőkör csillapítása már elég nagy lesz és nem jelent gondot a tüköradó elnyomása. Látható, hogy nagy KF frekvencia esetén a megismert $B=f_{KF}/Q$ összefüggés miatt nagy lehet a KF erősítő sávszélessége, ami a szomszédos adókat nem nyomná el kellőképpen. A jó tükörszelektivitás érdekében érdemes nagy KF és nagy HO frekvenciát választani. A kis KF frekvencia tehát a szomszéd adóra vett szelektivitás miatt jó, de a tüköradó kerül közelebb, így a tükörszelektivitásra nézve rosszabb. Ez a probléma az ún. *kétszeres transzponálással* (kétszeres keverés) oldható meg. Ilyenkor két keverő és két KF fokozat van a vevőben. Az antenna jele az első RF fokozatra kerül, amely a jó tükörszelektivitást biztosítja azzal, hogy az első KF értéke pl. 5 MHz, így a tüköradó távolsága 10 MHz. E fokozat együtt hangolódik a bemenő körrel, egyszerű a szűrő megvalósítása. Mivel ez a fokozat rossz szelektivitást mutat a szomszédos adóra, újabb keveréssel egy másik HO ezt a második KF frekvenciára keveri. A második HO frekvenciája például 5,1 MHz, így a második KF a két HO különbségéből 0,1 MHz-re adódik. A második KF fokozat erősítője ezt a 100 kHz-es jelet fogja erősíteni, ahol már a jó szelektivitás biztosítható. KH és RH esetén a KF 455 kHz (AM adók), FM esetén URH sávban 10,7 MHz.



Kétszeres transzponálású vevő tömbvázlata.

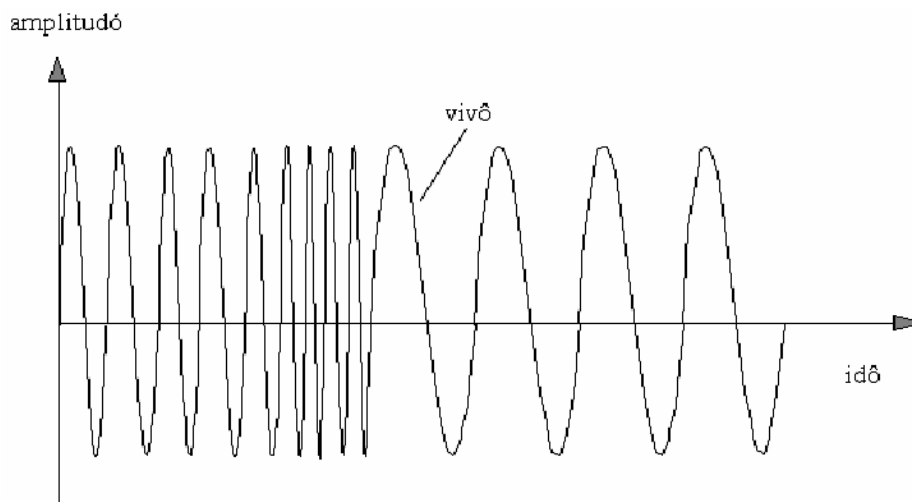
5.2 Frekvenciamoduláció (FM)

A frekvenciamoduláció az amerikai Edwin Armstrong nevéhez fűződik (1939). A módszer a második világháború után vált népszerűvé. Ebben az esetben az információt úgy ültetik a hordozóra, hogy annak frekvenciáját változtatják a moduláló jel amplitúdójának megfelelően, amplitúdója azonban állandó. A legnagyobb amplitúdójú (értsd: lehangosabb) moduláló jel változásához tartozik a legnagyobb frekvenciaváltozás a vivőben, ezt nevezzük Δf *frekvencialöketnek* (ez egy minimális és maximális frekvenciaérték közötti ingadozását jelenti a vivőfrekvenciának).

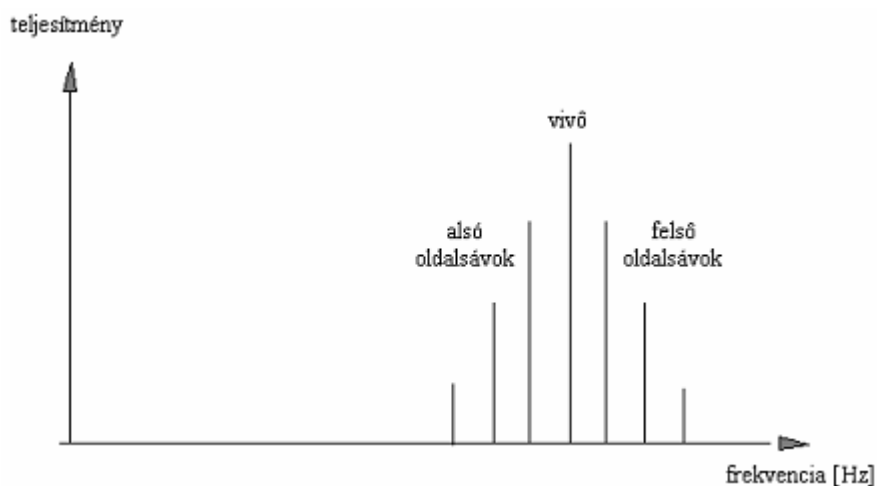
Modulációs mélység az $m = \Delta f / f_{\text{vivő}}$ hányados, amelynek ellentétben az AM-el, itt semmi jelentősége nincs. Fontos viszont a modulációs index, amely a $\Delta f / f_{\text{moduláló}}$ hányados. Más szóval, a moduláló jel amplitúdója a modulált jel frekvenciáját határozza meg, a moduláló jel frekvenciája pedig azt, hogy milyen időközönként változik majd meg a modulált jel frekvenciája. Az FM jel sáv szélessége a modulációs indextől függ. Ha a moduláció ún. keskenysávú, akkor az FM jel kb. $2B$ sáv szélességű, azaz az alapsávi jel duplája. Szélessávú FM-nél, ahol az index nagyobb egynél, az elfoglalt sáv kb. a löket kétszerese. Néhány összefüggés:

- a frekvencialöklet arányos a moduláló feszültség amplitúdójával (hangerősségével),
- a modulációs index egyenlő a maximális fázislöklettel,
- a maximális fázislöklet fordítottan arányos a moduláló frekvenciával,
- a maximális fázislöklet és a maximális frekvencialöklet arányosak.

Az egyszerűség kedvéért ismét tisztán szinuszos hullámokat tételezünk fel.



A legegyszerűbb FM moduláció időfüggvénye. A moduláló jel szinuszos, tehát a sűrűsödések üteme pontosan ennek megfelelően változik.



FM moduláció az idő- és a frekvenciatartományban.

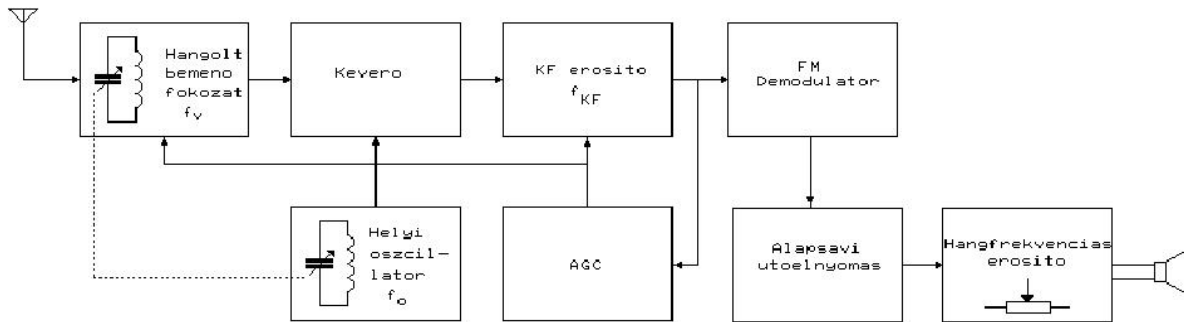
FM esetén a vivő környezetében jelennek meg az oldalsávok, megfelelő ütemben változva és adott távolságra. A spektrum meghatározása sokkal nehezebb, mint AM esetben.

- Ha a moduláló feszültség kicsi, a modulációs index is az. Ilyenkor a vivő mellett $f_v \pm f_m$ távolságra két oldalsáv is megjelenik, de maga az f_m nincs benne a spektrumban. Kis lökethél tehát nagyon hasonlít a spektrum az AM-re.

- A moduláló feszültség, és egyben az index növelésének hatására az oldalsávok amplitúdója nő, azonban meglepő módon a vivő amplitúdó csökken. Tovább növelve újabb oldalsávok jelennek meg $2f_m$, $3f_m$, $4f_m$ stb. távolságra, majd a vivő ismét növekedni kezd. Előfordulhat, hogy az oldalsávok nagyobb amplitúdójúak, sőt, hogy vivő egyáltalán nem jelenik meg, vagy éppen negatívvá is válhat (180 fokos fázisfordulás). A sáv szélesség tetszőlegesen nagyra is válhat.

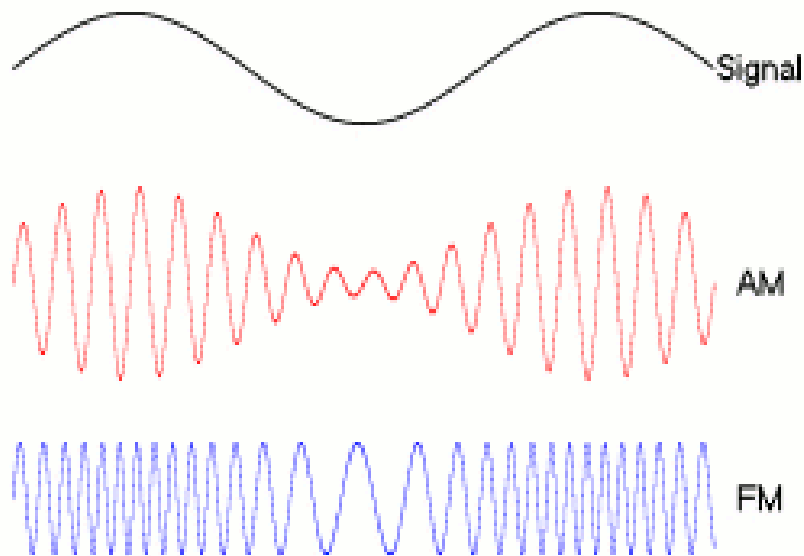
- A spektrálvonalak távolsága (szinuszos moduláló jel esetén) a moduláló jel frekvenciájától függ, nem pedig a lökettől! Bár elsőre meglepő, de a lökethézfrekvencia nincs képviselve a spektrumban.

Az FM jel amplitúdója nem hordoz információt, a zavarok hatására azonban változik. Így a demodulátort általában egy limiter előzi meg. FM demodulátort építhetünk tranzisztorból és két diódából, ún. amplitúdódiszkriminátor (meredekségetektor) segítségével. Hasonlóan, fázisdiszkriminátort is készíthetünk. A modern verziókban PLL (fáziszárt hurok) található. Ezek áramköri ill. részletes tárgyalása túlmutat a tantárgy keretein. Egyetlen dolgot jegyezzünk meg: FM moduláció esetén szükség van. ún. alapsávi *előkiemelésre* (az adó oldalon) és *utóelnyomásra* (a vevőben). Kimutatható ugyanis, hogy a demoduláláskor keletkező zajfeszültség arányos a frekvenciájával, azaz FM üzemben a hangszóróból magas frekvenciás zaj érkezik. Más szóval, magasabb frekvenciák zajosabbak lesznek az alacsony frekvenciáknál. Ezért a vevőben a magasabb hangokat csillapítják, elnyomják. Ahhoz, hogy ez ne okozzon hallható hangerősség problémát, az adóban előtte az alapsávi jelet ezzel ellentétesen fel kell erősíteni, előkiemeléssel. FM vevőhöz alkalmazhatjuk a szuperheterodin vevőt, amennyiben a demodulátort FM-re cseréljük.



FM vevő

Az amplitúdómoduláció (AM) előnye a keskeny sáv szélesség és az egyszerű és olcsó vevőkészülék. Hátránya a rossz hatásfokú adás és hogy zajérzékeny (atmoszférikus és kozmikus eredetű zajok, melyek a jelhez adódva többnyire annak amplitúdóját befolyásolják). A frekvenciamoduláció (FM) előnye, hogy az adó hatásfoka jobb és kevésbé érzékeny a külső eredetű zajokra, mert azok az amplitúdót befolyásolják, míg most az információt a frekvencia változása hordozza. Cserében az FM sáv szélessége nagyobb.



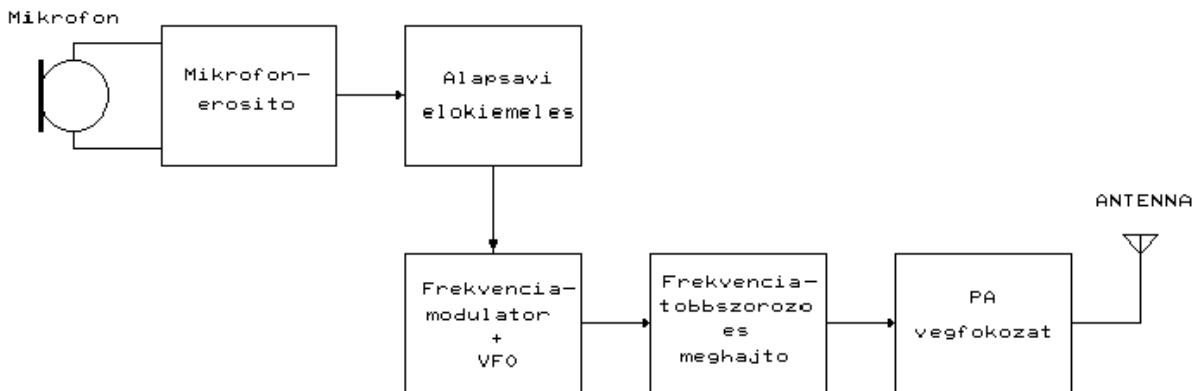
AM-FM összehasonlítás

Mindkét moduláció lényege, hogy a moduláló jel két paraméterének megváltozása a modulált jel két paraméterének változásában fog megnyilvánulni. AM-nél, ha a moduláló jel amplitúdója változik, a vivő amplitúdója is fog. Ha a frekvenciája, akkor a modulált jel sáv szélessége fog megváltozni. Ha növeljük az egyfrekvenciás szinuszos moduláló jel frekvenciáját, a két oldalsáv a vivő alatt ill. felett egyre távolodni fog a vivőtől. Így egy mozgó spektrumot kapunk, mely a moduláló jel függvényében vízszintesen mozog, közeledik ill. távolodik a vivőfrekvenciától, az oldalsávok magassága pedig a moduláló jel amplitúdójának ütemében mozog fel ill. le. FM-nél a helyzet kicsit más, itt a moduláló jel amplitúdója a frekvencialöketet és a modulációs indexet befolyásolja, ezáltal a modulált jel sáv szélességét (az amplitúdója nem változik eközben). Ilyenkor a névleges vivőfrekvencia közelében mozognak a spektrumvonalak vízszintesen a frekvenciatengely mentén, még hozzá éppen olyan messzire jutva el attól, amilyen „hangos” a moduláló jel. A moduláló jel frekvenciája pedig e mozgás sebességét

befolyásolja: ha gyorsan változó az egyfrekvenciás szinuszos moduláló jel (nagyfrekvenciás), akkor az amplitúdója által megszabott vízszintes távolságot a frekvenciatengely mentén az egyetlen spektrumvonal gyorsan futja be, míg az ugyanakkor amplitúdójú, de kisebb frekvenciás jel lassabban járja be. A spektrumanalizátoron ebben az esetben egy spektrumvonalat látunk mozogni, amely a névleges vivőfrekvencia körül szinuszosan mozog jobbra és balra (attól függően távolodva el tőle, milyen hangos a moduláló jel: ha hangos, messzebb kitér, ha halk, kisebb mértékben távolodik el a névleges frekvenciától); a mozgás sebessége pedig a moduláló jel frekvenciájától függ gyors, ha nagyfrekvenciás ill. lassú, ha kisfrekvenciás.

A rádióadásnál (különösen az olcsó amatőrsávokban) nagyon fontos, hogy a vivőfrekvenciát pontosan tartsuk. Ezért az adási frekvenciát meghatározó oszcillátort különös gondossággal építik meg. Érdekes lehet tehát egyetlen ilyen oszcillátort elkészíteni, és az esetleges további adási frekvenciákat ennek többszöröseként, frekvencitöbbszörözővel előállítani. Ez gyakran C-osztályú hangolt, nagyfrekvenciás erősítő, amelyben a tranzisztor kollektori rezgőkörét nem az alapfrekvenciára, hanem annak többszörösére állítják. Hibája ennek a rendszernek, hogy az alapfrekvencia megváltozása, elhangolódása többszörözve jelenik meg a későbbiekben, hiszen az eltolódás is felszorozódik. Ez kiküszöbölhető a keveréses adófrekvencia beállításával, ahol a HO mellett egy helyi keverő is van, mely előállítja a HO és a keverő összeg és különbségi frekvenciáját (hasonlóan a heterodin vevő KF-jéhez), és ekkor csak az alapfrekvencia csekély mértékű elállítódása fog megjelenni a nagyobb frekvenciákon is. A legmodernebbek kristálypontosságú PLL-t tartalmaznak a frekvenciák beállításához.

Az ábra egy FM adó tömbvázlatát mutatja. A mikrofonjelet a mikrofonerősítő erősíti a megfelelő szintre. Ezután következik az alapsávi előkiemelés, és általában egy amplitúdóhatároló áramkör, amely megakadályozza a túlmodulálást (a túl nagy löketet), végül az FM modulátor.

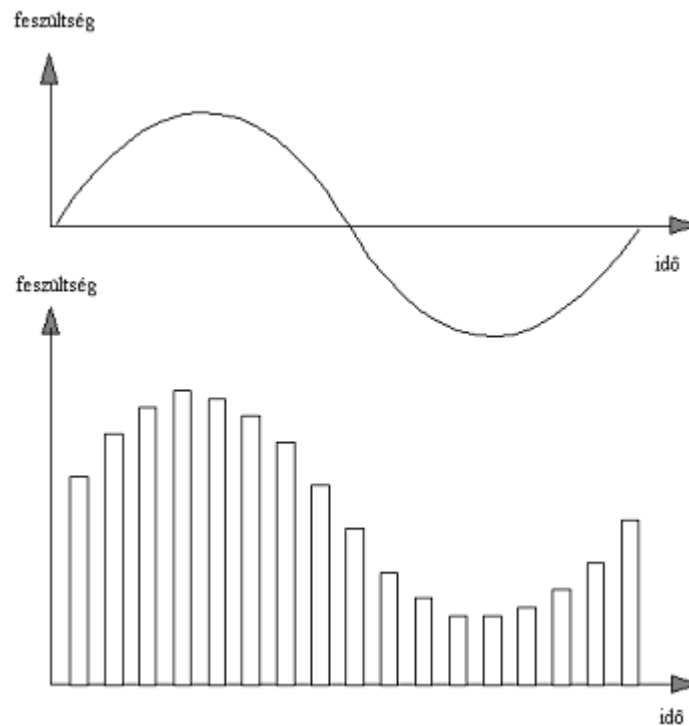


FM adó.

A fázismoduláció (PM) az FM moduláció rokona. Ilyenkor a moduláló jel amplitúdója a vivő fázisát befolyásolja. A fázislöket a moduláló jel maximális amplitúdóváltozásához tartozó maximális fázisszög-változás. Kimutatható, hogy az f_m egyfrekvenciás szinuszos moduláló jel esetén a $\Delta\Phi$ löketű fázismoduláció azonos egy $\Delta f = \Delta\Phi \cdot f_m$ löketű FM modulációval. Így a PM jel spektruma, sávban elfoglalt helye megegyezik ez esetben az FM jellel. Más szóval úgy is mondhatjuk, hogy az FM jel megfelel egy olyan PM jelnek, melynek fázislöketje fordítottan arányos a moduláló jel frekvenciájával. Ha egy fázismodulátorra olyan jelet adunk, amely összetevőt a frekvenciájával arányosan fokozatosan csökkentünk, FM jelet kapunk. Ha tehát PM adót akarunk létrehozni, ugyanarra van szükség, mint az FM adónál, csak az előkiemelés után egy integrátor fokozatot is be kell illesztenünk, ez fogja a jel amplitúdóját a frekvencia

arányában csillapítani. (Megjegyzés: az FM és a PM jel derivált-integrál kapcsolatban áll egymással.)

Az analóg modulációk egyik érdekes része a pulzus-amplitúdó moduláció és változatai. Ez az ún. PAM jel nem más, mint egy mintavétel, melynek során az impulzusok (minták) amplitúdója hordozza az információt, amely annak burkolójában jelenik meg. Dekódoláshoz – hasonlóan a mintavételnél – aluláteresztő szűrőre van szükség. Különlegessége, hogy nincs vivő.

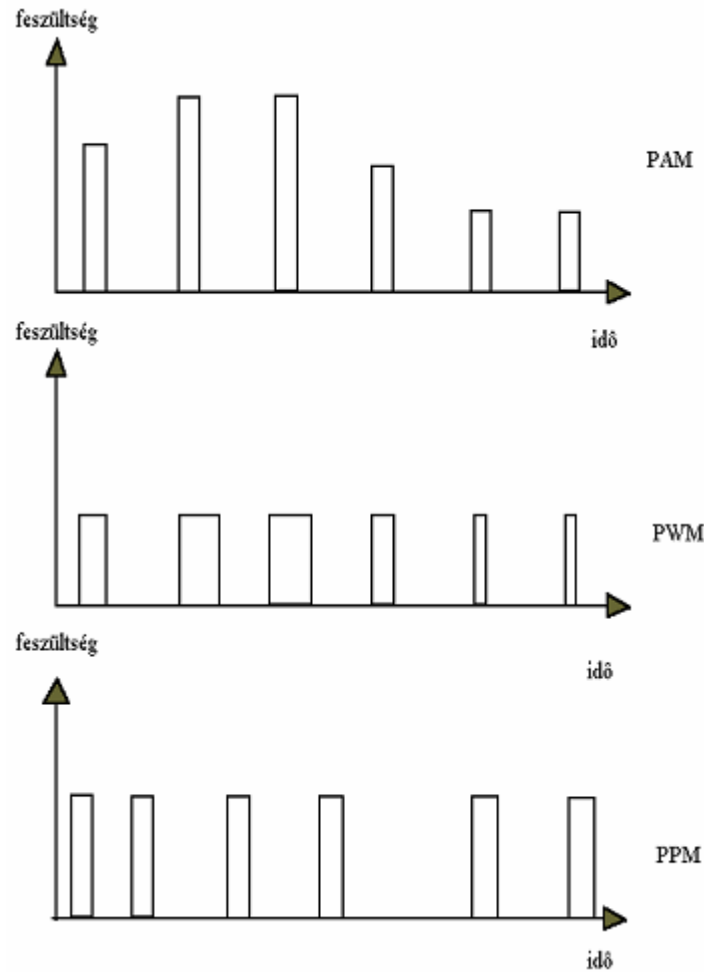


A PAM jel.

Elektromos áramkörökkel a változó magasságú PAM impulzusokat könnyen át lehet alakítani állandó magasságú, de változó szélességű impulzusokká, melyekben az impulzusok szélessége felel meg az analóg jel amplitúdójának. Ezt impulzusszélesség modulációnak hívjuk (PWM). Az impulzus pozíció modulációnál (PPM) az elektronikus áramkörökkel az impulzusok szélességének megváltoztatása helyett az impulzus időzítését változtatjuk meg. (Ha meredeken nő a jel, akkor sűrűbbek az impulzusok).

Mindegyik megoldás közös jellemzője, hogy ún. *vivőmentes* modulációs eljárások. Az impulzusnak tehát három paraméterét tudjuk változtatni a moduláló jel függvényében: az amplitúdóját, a szélességét ill. a számára kiosztott időben elfoglalt helyét.

Fontos észrevenni, hogy az impulzus-modulációk az analóg és a digitális eljárások között helyezkednek el: mivel mintavett jelről van szó (időben diszkrét impulzus-sorozat), már a definíció szerint nem analóg jel. Ugyanakkor, mivel értékkészlete nem kvantált, nem is digitális. A PCM megoldást leszámítva (amely konkrétan a digitális jelet jelenti), a többi „se ide, se oda” nem tartozik igazán. Talán szerencsés a vivőmentes modulációkat analógnak tekinteni.

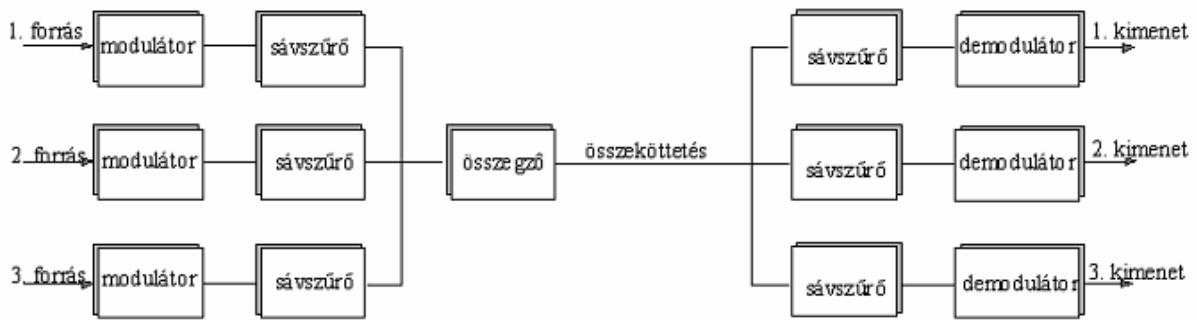


A vivő nélküli modulációs eljárások

5.3 A multiplexálás

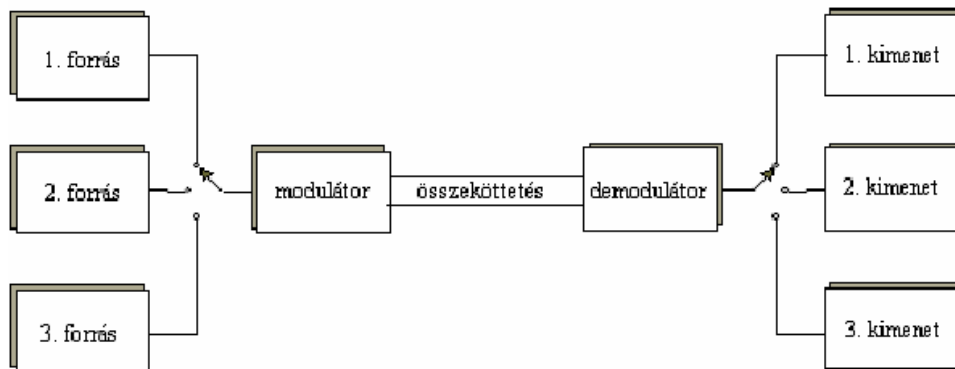
A **multiplexelés** azt jelenti, hogy egyidejűleg több jelet viszünk át egy adatátviteli csatornán anélkül, hogy a jelek elveszítenék azonosíthatóságukat. A **multiplexelést** nem szabad összetéveszteni a **modulációval**. A moduláció lehetővé teszi, hogy a kisfrekvenciás, vagy kényelmetlenül kezelhető jeleket rövidhullámú vivőn továbbítsuk. A multiplexeléssel több modulált jelet viszünk át ugyanazon időtartam alatt. (Megjegyzendő, hogy különbözőképpen modulált jeleket is multiplexelhetünk.)

Az emberi beszéd már jól érthető, ha az átviteli csatornán számára a 300 Hz és a 3400 Hz közötti tartományt biztosítjuk. Az összeköttetés sávszélessége azonban sokkal nagyobb. Így lehetővé válik, hogy ezt a szélesebb spektrumot keskenyebb frekvenciasávokra, alcsatornákra bontsuk, s mindegyiken egy időben hozzunk létre összeköttetést. Ezt a technikát **frekvencia-multiplexelésnek** nevezzük (FDM: Frequency Division Multiplex).



Az FDM elve.

A frekvencia-multiplexelés alternatívája az *időosztásos multiplexelés*, vagy *idő-multiplexelés*. Ebben a rendszerben a különböző információforrások jelét egymás után sorban mintavételezik, és az eredményt a megfelelő időpontban elküldik. A kommunikációs időt tehát felosztják a források között (TDM).

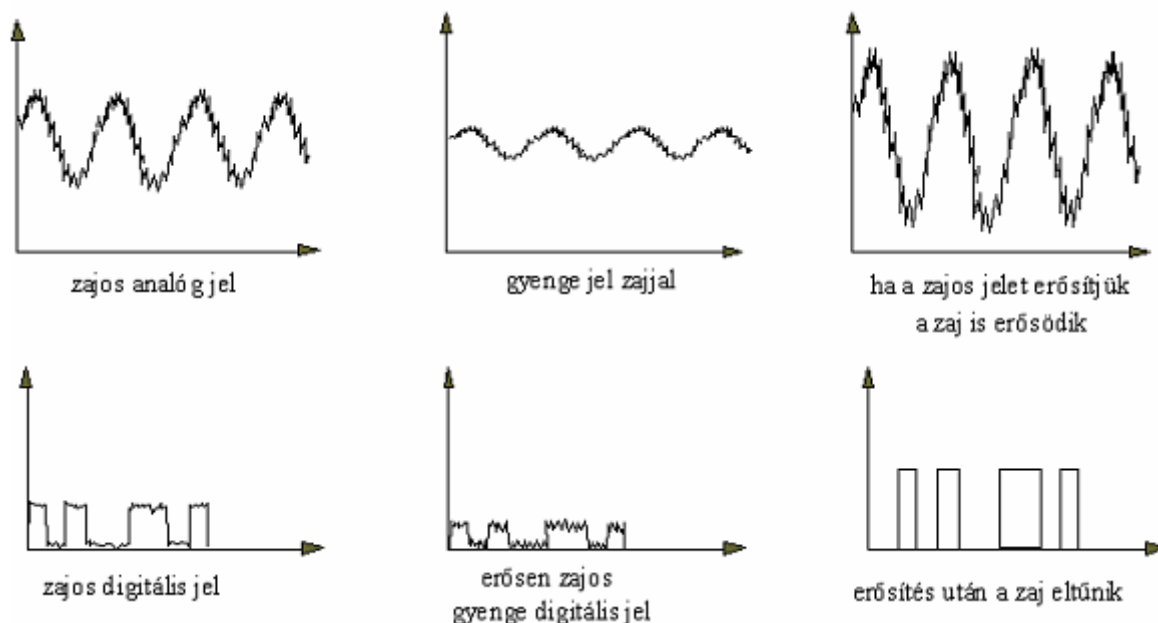


A TDM elve.

5.4 Digitális modulációk

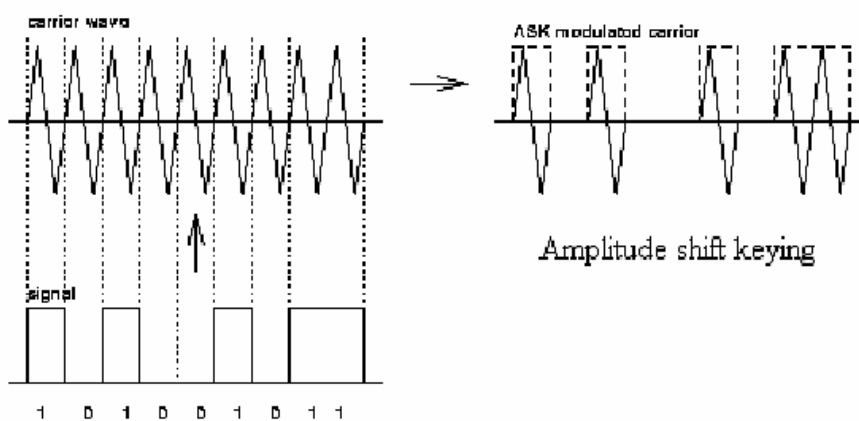
Az analóg műsorszórás, rádió- és tévéadók AM és FM modulációt alkalmaznak. A digitális műsorszórás elterjedésével, különösen a műholdas kommunikáció bevezetésével előkerültek a digitális modulációs eljárások. Digitális jelekhez, AM, FM (PM) és közvetlenül a PAM sem használható. Külön digitális modulációs eljárások léteznek, a legegyszerűbb a PCM (pulszkód moduláció), ahol adott mintavétel mellett adott bitszámú szavakba kódolunk. Ez a PAM jel továbbgondolása, a mintavételezett jel digitálissá alakításának felel meg. A PAM tehát a mintavételezés eredménye (lásd Shannon-tétel), a PCM pedig a digitális jel, a kettő előállításuk megfelel az analóg-digitális átalakítás folyamatának. Más szóval: az A/D-átalakítás nem más, mint egy digitális modulációs eljárás!

A lényege a digitális átvitelnek, hogy az analóg zavaroktól mentessé tegye az átvitelt. Az ábrán jól látható, hogy míg egy analóg átvitelt ugyanaz az analóg zavar elront és megmásít, addig (ha az nem túl nagy) a digitális átvitel elvben hibamentes lehet.

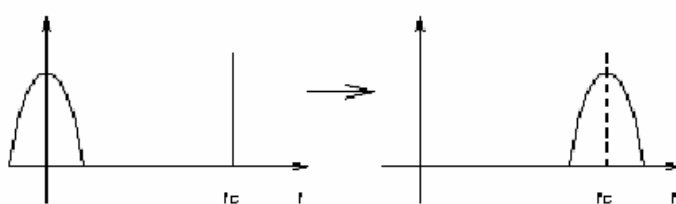


A fent bemutatott három eljárás közös ismérve, hogy nincs vivő. A mintavételezett jellel végzünk közvetlen módosítást. Természetesen léteznek vivős digitális modulációs rendszerek is. Ennek legegyszerűbbjeit mutatjuk be.

A diszkrét AM modulációt ASK-nak nevezzük. A rövidítés feloldása: Amplitude Shift Keying, magyarul fordítva a szinuszos vivő ki-be kapcsolgatásával bináris átvitelt tudunk megvalósítani. Ha van vivő, akkor a bit 1, ha nincs akkor nulla. Hasonlóan, ha a szinuszos vivő frekvenciáját kapcsolgatjuk (állandó amplitúdó mellett), akkor FSK-ról beszélünk. Ilyenkor az egyik bitet az f_1 , míg a másikat egy f_2 frekvencia hordozza. Vegyük észre, hogy egyszerre mindkettőt is alkalmazhatjuk, a vivőnek frekvenciája (leginkább helyette a fázisa) és az amplitúdója is hordozhat információt!



Amplitude shift keying



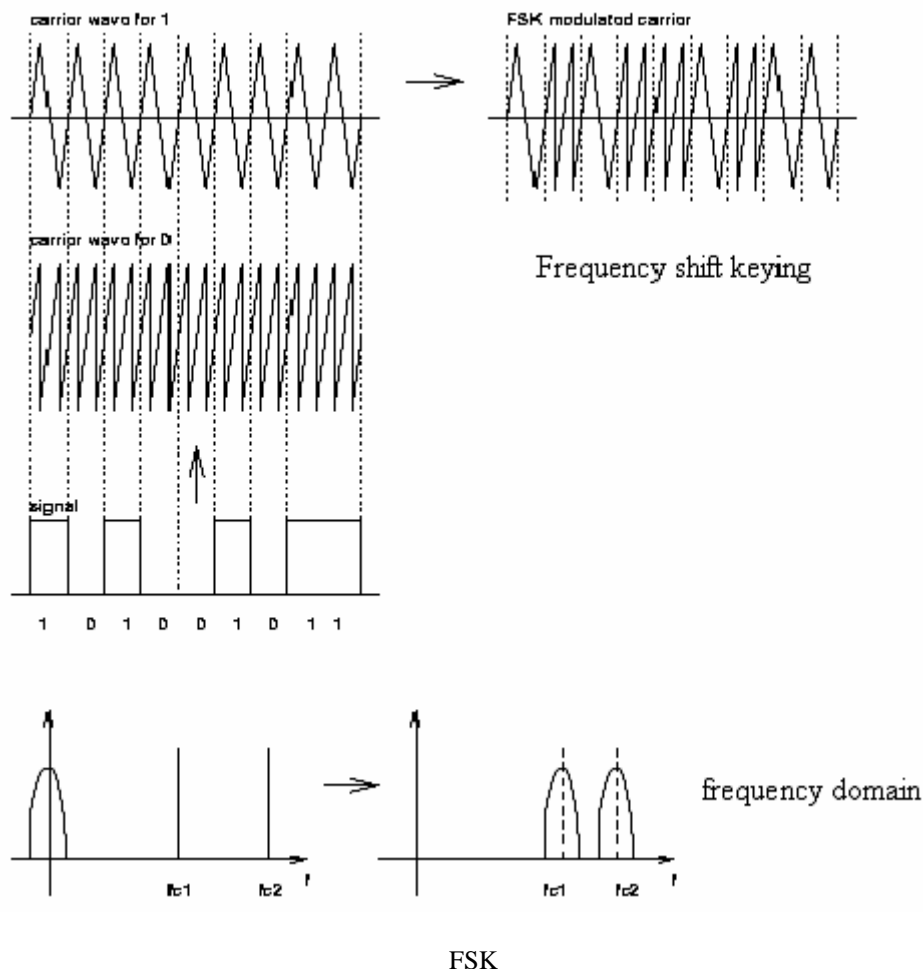
frequency domain

ASK

Az ASK frekvenciaspektruma nem kézenfekvő. A logikus válasz az lenne, hogy mivel csak a vivőfrekvencia ki-be kapcsolásáról van szó, a spektrumban csak a vivő jelenik meg és a kapcsolgatás ütemében eltűnik, majd megjelenik. Ez azonban hibás elképzelés, ugyanis a kapcsolgató jel frekvenciájának (spektrumának) is meg kell jelennie valamilyen formában az ASK jel spektrumában.

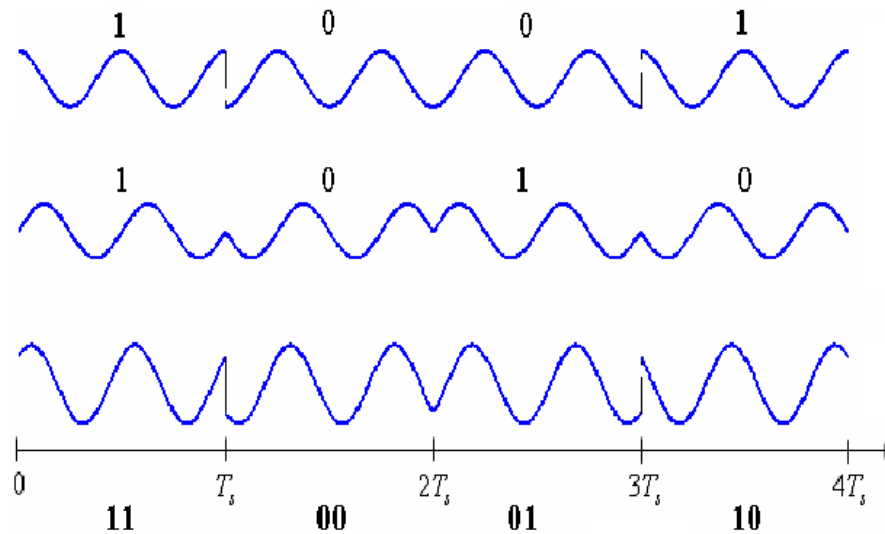
Például, egy 50 Hz-es vivő és egy 2 Hz-es kapcsolgató jel esetén a kapcsolgatás „sebessége” kifejezésre kell jusson az időtartományban és a spektrumban is. A 2 Hz-nek 0,5 s felel meg, ilyen ütemben jelenik meg a vivő ill. tűnik el. Ez a spektrumban úgy látszódik, hogy az 50 Hz-es komponens mindkét oldalán megjelennek a 2 Hz-es különbség páratlan egészszámú többszörösei, azaz 48, 44, 40 Hz stb. ill. 52, 56, 60 Hz stb. Ennek magyarázata, hogy a kapcsolgatás nem más, mint egy ún. kapuzó jellel való szorzás. A kapuzó jel 1 ill. 0 értékű, üteme pedig 2 Hz. Egy 2 Hz-es négyesjellel a spektrumát a Fourier-tétel megmondja nekünk: 2 Hz-es alaphang és tőle páratlan számú többszörösök $3 \cdot 2 = 6$ Hz, $5 \cdot 2 = 10$ Hz, $7 \cdot 2 = 14$ Hz stb., mindez exponenciálisan csökkenő amplitúdóval. Márpedig ha ezzel a jellel beszorzunk egy vivőt, a spektrumnak tükröznie kell ezt a hatást.

FSK esetén a modulált jel spektruma felkeverődik a két frekvenciára.

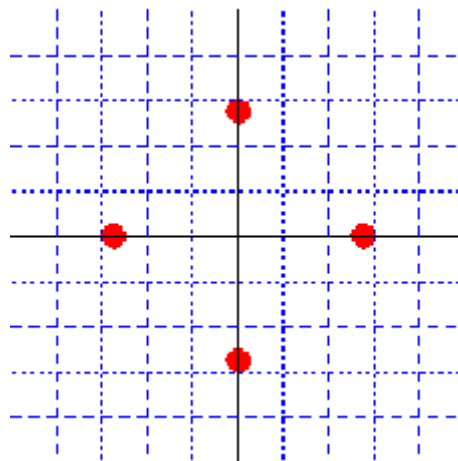


A szinuszos vivőnek van még egy paramétere: a kezdőfázisa. Ha ez hordozza az információt, akkor fázismodulációról beszélünk (PSK). Ilyenkor a szinuszos vivő fázisa változik a bitidő elején. Két állapot (BPSK) esetén ez 0 és 180 fok, azaz „lefelé” vagy „felfelé” indul az azonos frekvenciájú és amplitúdójú csomag. QPSK esetén négy fázisállapot van (0, 90, 180 és 270

fok). Minél több az állapot, annál gyorsabb az átvitel, hiszen annál több bit alkot egy szimbólumot. Négy állapotnál a 00, 01, 10 és az 11 szimbólumokat vesszük át. Természetesen, minél több az állapot, annál nehezebb a dekódolás. Ez a csatorna jel-zaj-viszonyától függ. Az ilyen modulációkat gyakran a fázisábrával adjuk meg.



QPSK jel időfüggvénye 45, 135, 225 és 315 fokos viszonyok mellett.

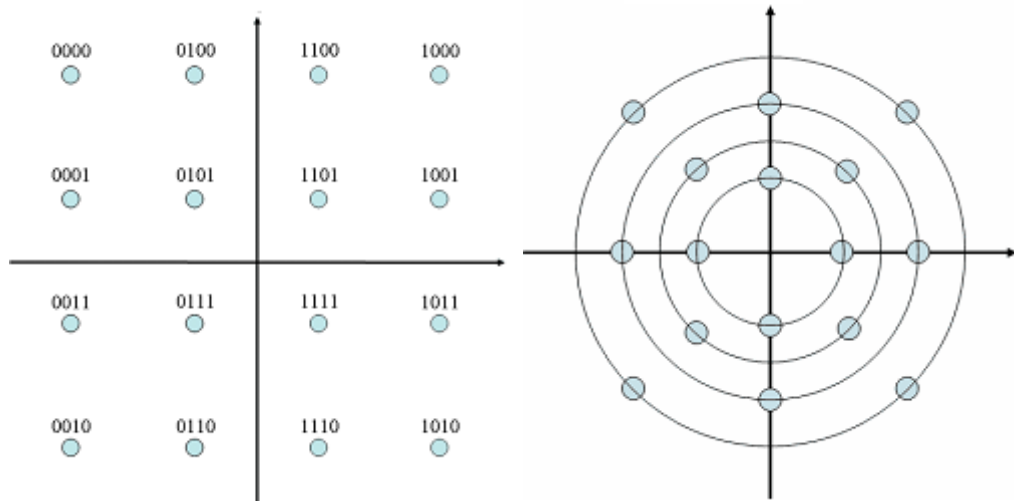


QPSK moduláció optimális elrendezésben (maximális fázislöket 90 fok). Ugyanez az ábra tartozik a 4QAM modulációhoz is.

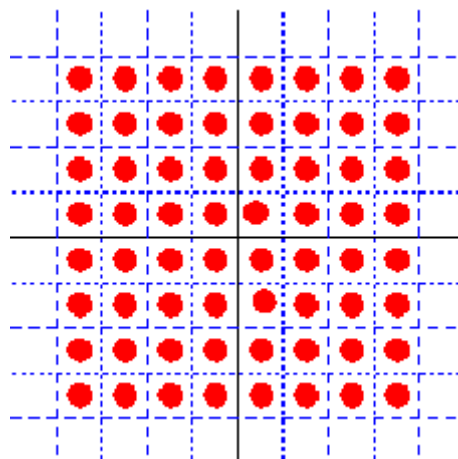
Az egyik legismertebb digitális modulációfajta a QAM: kvadratúra amplitúdó moduláció, ahol két egymásra merőleges, azonos amplitúdójú és frekvenciájú vivőt modulálunk. Ezzel a speciális eljárással két különböző moduláló jelet vihetünk át. A QAM elé írt szám jelzi, hogy hány állapotú a moduláció. Ha pl. csak négy, akkor 4QAM-ról beszélünk, és ez teljesen megfelel a QPSK modulációnak! Ahogy az amplitúdó is változik, több állapotú, pl. 64QAM vagy 256QAM is lehetséges. A 64QAM a DVB-C, a digitális kábeltévé eljárása, amellyel 6 bites szimbólumok vihetők át.

A vivő frekvenciája állandó, de önmagához képest az időben el van tolva: sin és cos verzióban is létezik. A moduláló jeleket két különálló ún. balanszmodulátorra vezetik rá, amelyek a sin ill. a cos vivőre ültetik azokat. A két modulátor kimenete algebrailag kerül összeadásra, amely a ténylegesen kisugárzásra kerülő modulált QAM jel. Ez a jel DSB jel, a vivő azonban (részben

vagy teljesen) elnyomható. Vételkor a modulált jelből kell kinyerni a vivőt, melyet ismételtelen el kell tolni az időben hogy a demoduláláshoz létrejöjjön a sin és cos verzió. Ezek a vivők aztán két demodulátorra jutnak, melyek kimenetén megjelennek a moduláló jelek.

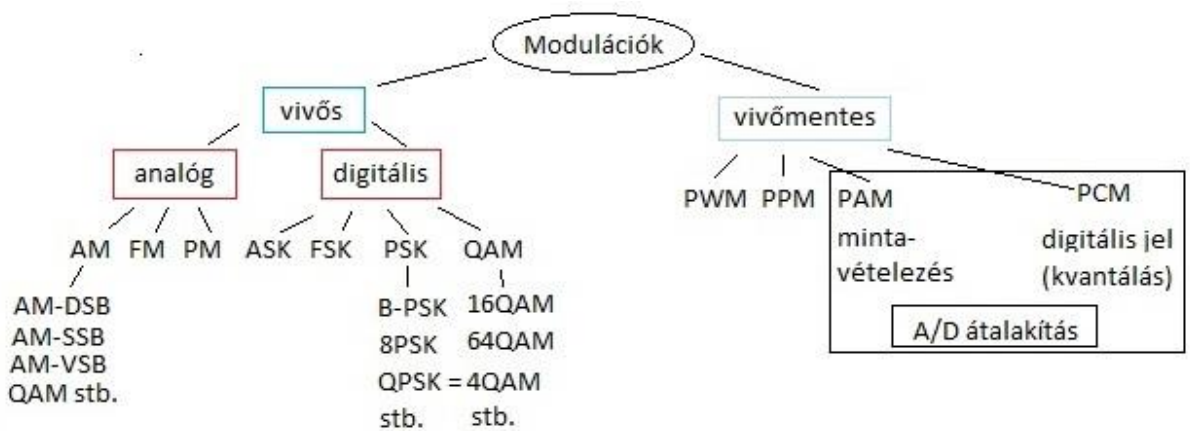
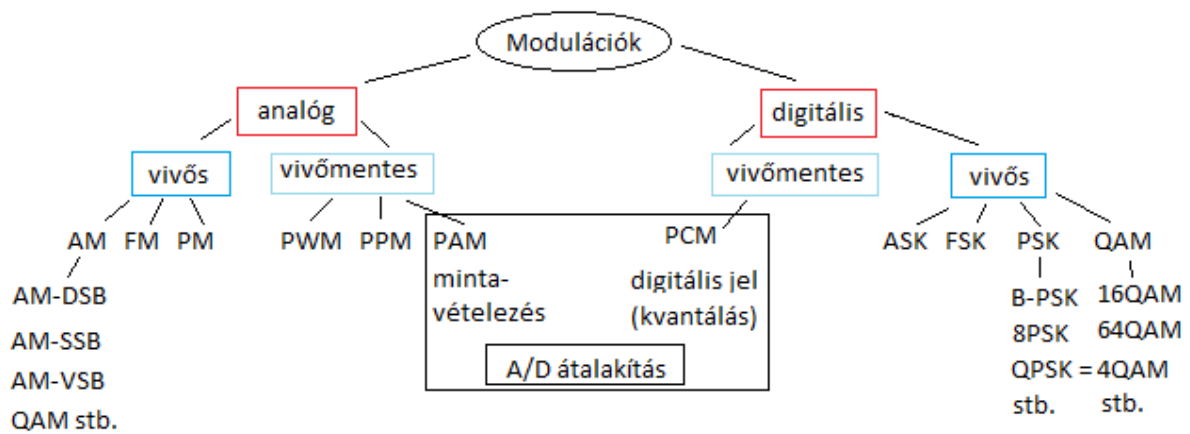


Különböző 16QAM modulációk konstellációs diagramja.



A 64QAM fázisábrája

Az alábbi két ábra a megismert modulációk csoportosítását mutatja kétféle módon. Az egyik klasszikus analóg-digitális felosztásban, ahol látható az „átmeneti” rész is a vivőmentesek esetén. A másik ábra másfajta módon végzi az osztályozást, elkerülve a vivőmentes eljárások analóg/digitális besorolását.



6. Műholdas műsorszórás

A műholdas távközlés több részből áll. Ennek legfontosabbika a műsorszórás, amely elsőként nyitotta meg a polgári alkalmazás számára a technológiát. E mellett a klasszikus távközlés (műholdas telefonok, repülésirányítás), internet, űrkutatás, meteorológia, helymeghatározás, katonai alkalmazások mindegyike más és más megoldásokat igényel. Itt most a műsorszórásra és a helymeghatározásra térünk ki, megemlítve a különféle lehetőségeket.

A műholdas műsorszórás speciális helyzetben van a földihez képest. A földi analóg műsorszórás része a rövid-, közép- és ultrarövidhullámú rádiózás ill. tévéadások. Az URH sávban FM, KH-on AM moduláció használatos. Az analóg TV adók néhány száz MHz-en adtak, részben itt található digitális televíziózás is. Mindegyik jellemzője, hogy nagyon kevés hely áll rendelkezésre egy csatornának. A TV adók pl. 8 MHz-be kell, hogy beleférjenek, ami behatárolja a kép és a hang minőségét. Ráadásul – ahogy az antenna és hullámterjedés részben láttuk – a hatótávolságok is korlátozottak.

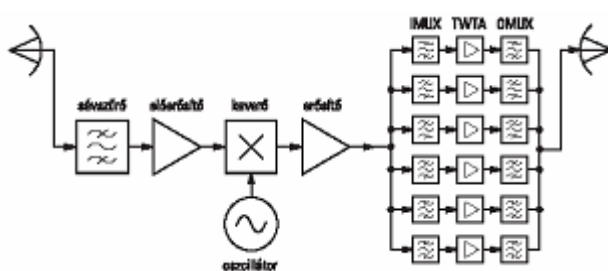
Ezzel szemben a műholdas műsorszórásnak két nagy előnye is van: nagyobb a sáv szélesség, több és jobb minőségű műsort tudunk közvetíteni, továbbá, a betérített terület is hatalmas (kontinensnyi). Igaz, a vételhez speciális antenna (paraboloidtükör) és beltéri egység szükséges. Műholdon mikrohullámú összeköttetést valósítunk meg. Gyakorlatban 1 GHz felett beszélünk mikrohullámról, de néha „csak” 3 GHz-től. Ez természetesen a vivőt jelenti minden esetben. A teljes csatornasáv szélesség 27-36 MHz lehet, 11 GHz-es vivő esetén. A szélesebb csatorna, jobb jel/zaj viszonyt is eredményez.

A műsorszóró műholdak a Föld felszíne (az Egyenlítő) felett 36000 km magasan, ún. geostacioner pályán vannak. Ennek hatása, hogy keringési idejük megegyezik a Föld forgási idejével, magyarul a Földről nézve állni látszanak. Itt jegyezzük meg, hogy a geostacioner pályák mellett léteznek más pályák is, mint pl. a Molniya vagy a LEO (Low Earth Orbit). Utóbbiakon egyéb szolgáltatások (GPS, adatkommunikáció, felderítés, meteorológia) zajlanak. Ezek sokkal alacsonyabban vannak, 200-1200 km-re a felszín felett. A nagy távolságokból adódóan számítanunk kell a fáziskésleltetésre: a különböző frekvenciájú komponensek más ideig terjednek. Továbbá, több tízezer km esetén az időbeni késleltetések is észrevehetők. Ilyen távolságok áthidalására a mikrohullámú összeköttetés alkalmas. Sajnos, a mikrohullám egy további tulajdonsága, hogy a megszokott kábeleinken nem „hajlandó” terjedni, így pl. a kábeltévében megszokott koaxiális kábel sem használható. Mikrohullámú jeleket ún. (cső)tápvonalon terjesztünk, és egy keverő fokozattal keverjük le olyan megfelelő frekvenciára, amely már képes a koax kábelen is terjedni. A mikrohullámú vivőt meglehetősen szélessávú jellel is lehet modulálni, és viszonylag kis méretű antennával lehetséges elég keskeny (irányított) nyalábot létrehozni. Ne feledjük, a földi feladó állomás feladata, hogy egy tőle 36000 km-re lévő műholdat úgy találjon el, hogy a mellette lévő műholdat elkerülje a nyaláb! A mikrohullám nem hajlik el, a földön is egyenesen terjed: az összeköttetés a látóhatárig terjed (optikai rálátás kell, minél magasabba tesszük az antennát, annál messzebb lát el). A maximális táv kb. 50 km, e felett ismételni és erősíteni kell. Az ismétlő műholdon is lehet.

A műsorszórásra kihasznált frekvenciák: 4-6, 12-14, 20-30 GHz, ahol a nagyobb mindig az ún. uplink, míg a kisebb a downlink frekvencia. Erre a szétválasztásra azért van szükség, mert a műhold gyakran ugyanazzal az antennával veszi és adja (ismétli lefelé) az adást. A műhold gyakorlatilag egy ismétlő-terítő eszköz, mely „egyben” megkapja több csatorna multiplex jelét, majd azt megfelelően szétválasztja (szűr) és erősíti, végül pedig nagy nyalábot létrehozva szétteríti a földfelszínen. Ezt a feladatot a transzponderek látják el, amelyből több is van egy műholdon (tartalékokkal együtt).



Egy műhold által látott terület (footprint)



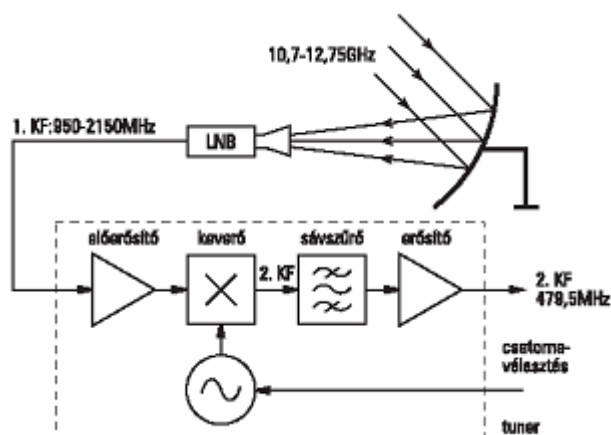
A műhold transzponderének blokkvázlata.

Egy műhold hivatásánál fogva sok földi állomással tud kommunikálni (többszörös hozzáférésű). Az alkalmazott moduláció általában QPSK. Az élettartam a pályakorrigáláshoz szükséges üzemanyagtól függ (energiaellátás napelemmel történik).



Geostacioner és elliptikus pálya

A digitális televíziózás is műholdon kezdte meg hódító útját. A DVB-S (Digital Video Broadcast-Satellite) volt az első, ahol az MPEG2 kép- és hangtovábbítást megvalósították. Ezt követte a kábeles (DBV-C) illetve a mai kor terméke, a földfelszíni műsorszórás (DVB-T).



A műholdas jel vételéhez egy alacsony zajú fejre és keverésre van szükség, hogy koax kábelt használhassunk, valamint hogy a tévé is fel tudja dolgozni.

A geostacioner pályapozíció előnye, hogy az antennát a földön nem kell mozgatni. Minden más műholdpályán a műholdak mozognak látszanak, így a feladó és vevőantennákat is forgatni kell, maguk a műholdak pedig a Holdhoz hasonlóan felkelnek, lenyugszanak, néha több is látszik belőlük egyszerre. Jellemzőjük, hogy egy műholddal csak a napszak korlátozott idejében lehet kommunikálni, és egymást váltva jelennek meg az égbolton. A folyamatos, 24 órás összeköttetéshez legalább 4-6 műhold alkot egy családot, de néha ennél sokkal több is.

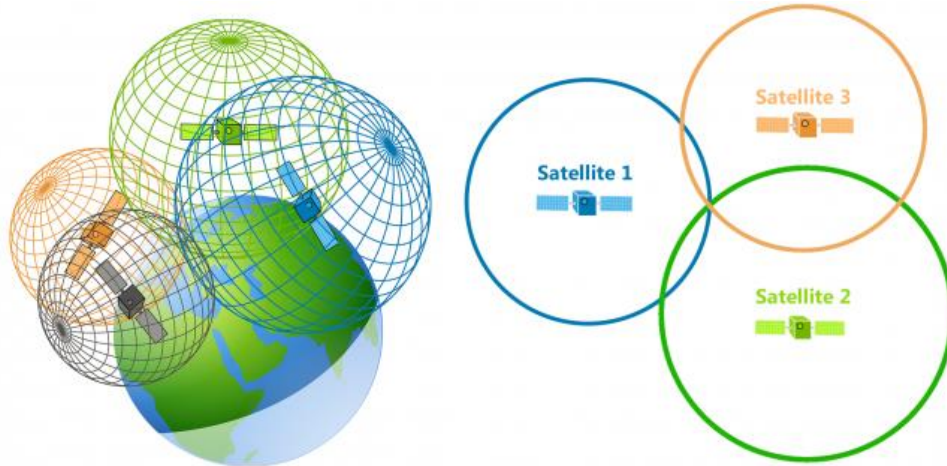
6.1 Helymeghatározás

A GPS nem műsorszóró rendszer, nem is geostacioner pályán keringenek a holdak. 20000 km magasan 24 holdból álló flotta alkotja, de valóságban 31 hold van fent. Célja, hogy több műholdat látva a vevőkészülék számításokkal (ún. háromszögeléssel) képes legyen saját helyzetét a földfelszínen meghatározni. A méréshez nagyon pontos órákra és a távolságok ismeretére van szükség. A GPS mellett az európai Galileo és az orosz GLONASSZ rendszer is aktív.

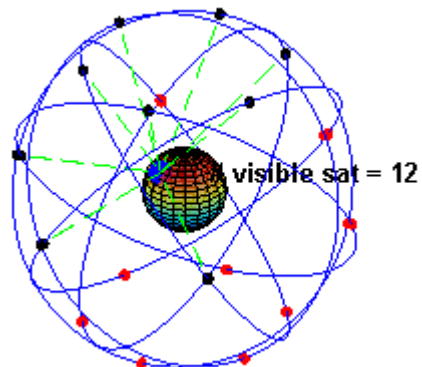
A rendszer működése azon alapszik, hogy a műholdak egyszerre, azonos időben sugározzák a pontos időt, és saját pozíció-adataikat. A pozíció meghatározásához min. három műhold adatainak vétele szükséges, négyből elvben magassági (3D) adatok is számíthatók. A gyakorlatban azonban a rendszer ismert pontatlanságait figyelembe véve legalább 4 műholdat használnak a pozíció meghatározásához. A geodéziai műszerek minimum 5 műhold folyamatos vételét igénylik. Két atomóra is van, amelyek frekvenciája biztosítja a kódokhoz szükséges alapfrekvenciát (időzítéseket). A távolságok a jel terjedési sebessége és az idő információ alapján számolhatók a műhold és a vevő között. Az órák járására a rendszer érzékeny. A speciális relativitáselmélet szerint a Földről nézve mozgó holdon az idő lassabban telik, amely 7 μ s késést okoz naponta. A gravitációs hatás 45 μ s sietést okozna naponta, ezt a földi állomások korrigálják. Ettől a 15 méteres pontosság 2 perc alatt elromlana, egy nap alatt pedig 11,4 km-re nőne. A GPS műholdak két frekvencián sugároznak, ezeket L1-nek (1575,42 MHz) és L2-nek (1227,6 MHz) nevezik. Két kódot is sugároz, a pontosabb helymeghatározáshoz valót csak katonai eszközzel lehet dekódolni. Korábban volt egy zavaró jel, ami csak párszáz méteres pontosságot okozott, de ezt 2000-ben leállították az amerikaiak.

Az első műholdtól való r_1 távolság azt jelenti, hogy a megfigyelő olyan r_1 sugarú gömbön helyezkedik el, aminek a középpontja az első műhold. A második műholdtól való r_2 távolság azt jelenti, hogy a megfigyelő ezen a második a gömbön is rajta van, tehát a két gömb metszésvonalán, azaz egy körön helyezkedik el. A harmadik műholdtól való távolságot

felhasználva tehát a megfigyelő az r_1 , r_2 és r_3 sugarú gömbök metszéspontján helyezkedik el. Az előbbieket szerint az r_3 gömb az r_1 , r_2 gömbök metszőkörét két pontban fogja elmetzeni, amelyek közül a rendszer ki tudja választani a valóságosat illetve a hamisat: a másik ugyanis vagy nagyon a Föld belsejében vagy a világűrben lesz.



GPS háromszögelés.



24 műholdból álló GPS flotta elhelyezkedése. A pontos helymeghatározáshoz 4 hold jele is elegendő, az ábrán 12 hold látható a vételi helyen. Sík terepen 7-12 hold látható optimális esetben.



GPS műhold

Ámde a fenti eljárás csak akkor ad pontos eredményt, ha a vevő órája szinkronban jár a műholdakéval. Ezt a 4. műhold segítségével oldják meg: ha az óra szinkronban jár, akkor a 4., az r_4 sugarú gömb pontosan a három gömb metszéspontján megy át, ha viszont nem áll fenn a szinkron, akkor minden gömbhármás más és más metszéspontot ad. Ezért a vevőberendezés úgy korrigálja a saját órájának a beállítását, hogy a négy metszéspont végül egy pontba kerüljön. Ezért kell legalább 4 műholdat figyelni, és ezért nem kell atomórát építeni a vevőkészülékbe.

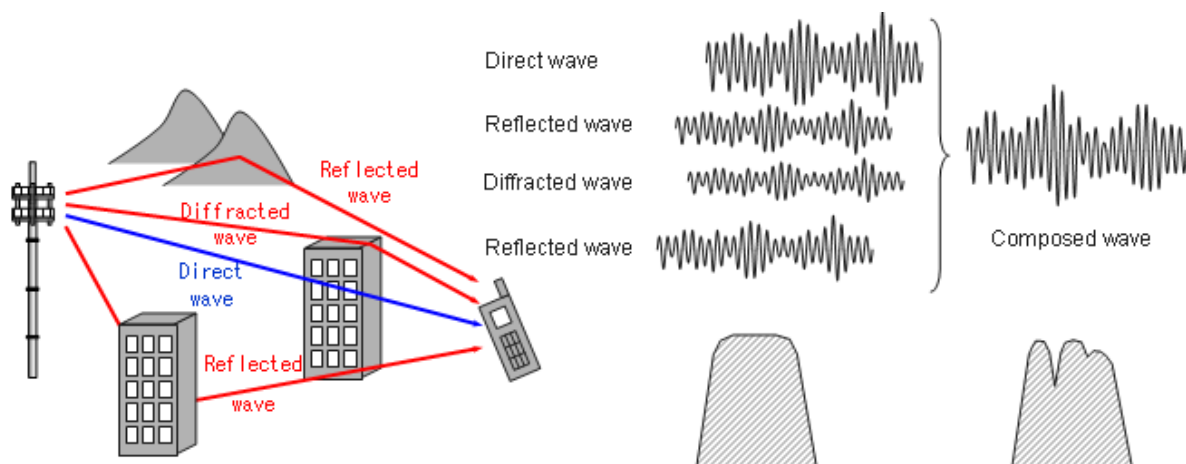
7. Mobil kommunikáció

Mobil a kommunikáció, ha legalább az egyik végpont mozog (amely csak vezeték nélküli lehet). Tekintettel arra, hogy a rádióhullámok az országhatárokat nem tisztelve terjednek, nemzetközi hivatalok szabályozzák a kommunikációt (frekvenciák, adók teljesítménye). A frekvencia éppen ezért erőforrás, kincs, amivel gazdálkodni kell (és fizetni érte).

A mobil kommunikáció legegyszerűbb fajtája a *diszpécser* szolgálat: egyirányú szimplex átvitel, adó/vevő kapcsolója van a készüléknek. Lehet egyfrekvenciás az egész működés, ahol az adás és a vétel frekvenciája megegyezik. Létezik ún. kétfrekvenciás szimplex is (2-5% különbség a két frekvencia között).

A duplex átvitel kétirányú. Két frekvencia kell, az egyik az adásé, a másik a vételé. Az adót, vevőt és az antennát az ún. duplex szűrő egyesíti. Ha a mozgó eszköznek nincs duplex szűrője, akkor félduplex az üzemmód. Duplex szűrő olyan analóg rendszerhez kell, ahol teljesen valós időben, egyidőben megy az adó/vevő; digitálisban az időrések feloldják ezt a problémát.

A legnagyobb probléma, amivel mobil kommunikációban szembesülünk, a *többutas terjedés*. A vevőbe nem csupán az adóantennából érkező közvetlen hullám érkezik, hanem a Földről és a tereptárgyakra visszaverődve, ugyanannak időben késleltetett és csillapított verziója is beérkezik. Ráadásul ennek mértéke, ingadozása a mozgás következtében állandóan változik. Végül hozzácsapódnak a légkör okozta és egyéb zavarok. A vételi térerősség ilyenfajta ingadozását *fading*-nek nevezzük.



Többutas terjedés szemléltetése.

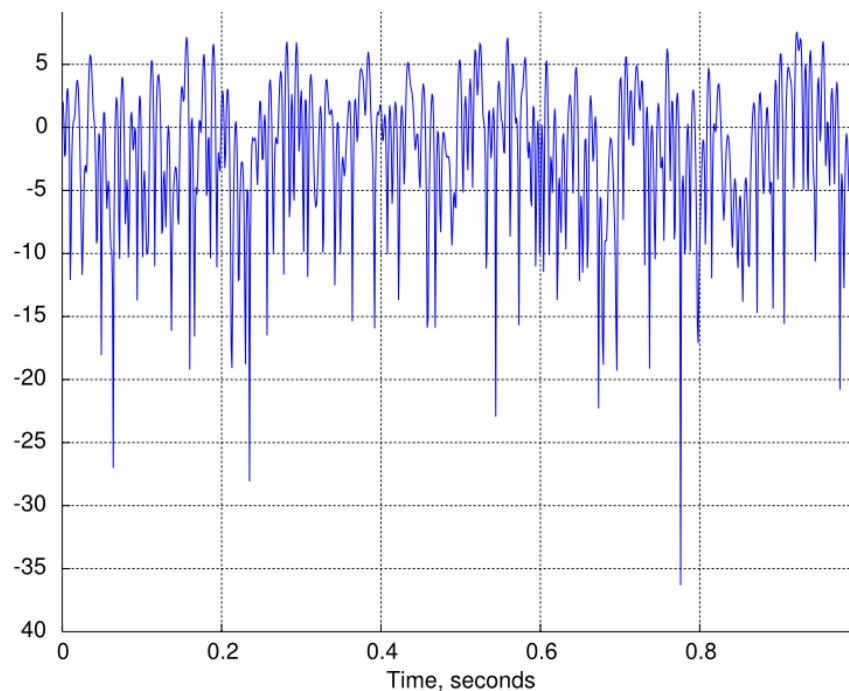
Analóg technikánál ill. alacsony bitsebességű átvitelnél (analóg rádiók, TV, 40 Mbps alatti digitális átvitel), a fading jórészt szélessávú, frekvenciafüggetlen, így csak időben változó térerősségingadozást okoz. Ez esetben az ún. fadingtartalékkal védekezhetünk, ilyenkor az adóteljesítmény növelése hatásos ellenszer, különösen digitális esetben, ahol ezzel garantálhatjuk a jó jel/zaj viszonyt és bithibaarányt. Egyéb esetekben a fading frekvenciafüggő, azaz szelektív, ez ellen az adóteljesítmény növelése nem segít. Két dolgot tehetünk: az első az *adaptív kiegyenlítés*, amikor valahogy állandóan mérjük a csatorna átvitelét és azt szűrőkkel dinamikusan kiegyenlítjük. A másik megoldás a *diversity-rendszer*, amely vagy térben vagy frekvenciában használ több átviteli utat. Térdiversity esetén két vevőantenna és két vevő van egyetlen vevőegységben (vevő-diversity). Az is lehet megoldás, hogy az adóban van két antenna és a vevőben egy (adó-diversity). Frekvenciadiversity esetén két különböző frekvencián megy át az adat egyidejűleg. Az ötlet egyszerű: kétcsatornás átvitelnél kisebb a

valószínűsége a nagy hibának. A korábban megismert TDM multiplexelés valójában a harmadik megoldás: az idő-diversity.

A sok, véletlen nagyságú és fázisú vektor eredőjét a Rayleigh-fading (gyors fading) modell írja le, ez csak akkor lép fel, ha mobil kommunikáció esetén a bázisállomás és a vizsgált pont között mozgó tárgyak vannak. Ha nincs mozgó tárgy, a térerősségkép áll, időben csak akkor mozdul el, ha a vevőantenna mozog. A gyors fading-et a tereptárgyak, fák, növényzet árnyékolja és kiátlagolja (ez a lognormál fading). A bázisállomástól távolodva a térerősség bár enyhén ingadozik, 40 dB/dekád-al esik. Gyors mozgás esetén a Doppler-hatással is számolni kell.

A szelektív fading által létrehozott „lyukak” sáv szélessége 100 Hz nagyságrendű lehet. Ezek az adó spektrumában mozogva gyakran eltalálják a vivőhullámot. Hatásukra lecsökken a vivőhullám amplitúdója, miközben az oldalsávokban nem lép fel jelentős változás. Felborul viszont a vivő-oldalsáv arány, ami lehetetlenné teszi a torzításmentes vételt. További minőségromlást jelent, hogy a vevőkben alkalmazott automatikus erősítésszabályozás (AGC) is a vivőt használja referenciaként. A vevő AGC a lecsökkent vivőre úgy reagál, hogy megnöveli a vevő középfrekvenciás erősítését, azaz közvetve a hangerőt. A hallgatót kettős hatás éri: torzul a vett jel, és megnő a hangerő, s ez a hullámterjedéstől és az ionoszféra állapotától függően 2-30 másodpercenként ismétlődik.

Bizonyos szint és késleltetés után analóg képnél a többutas terjedés miatt szellemképet kapunk (megfelelő irányítottságú tetőantenna kell ellene).

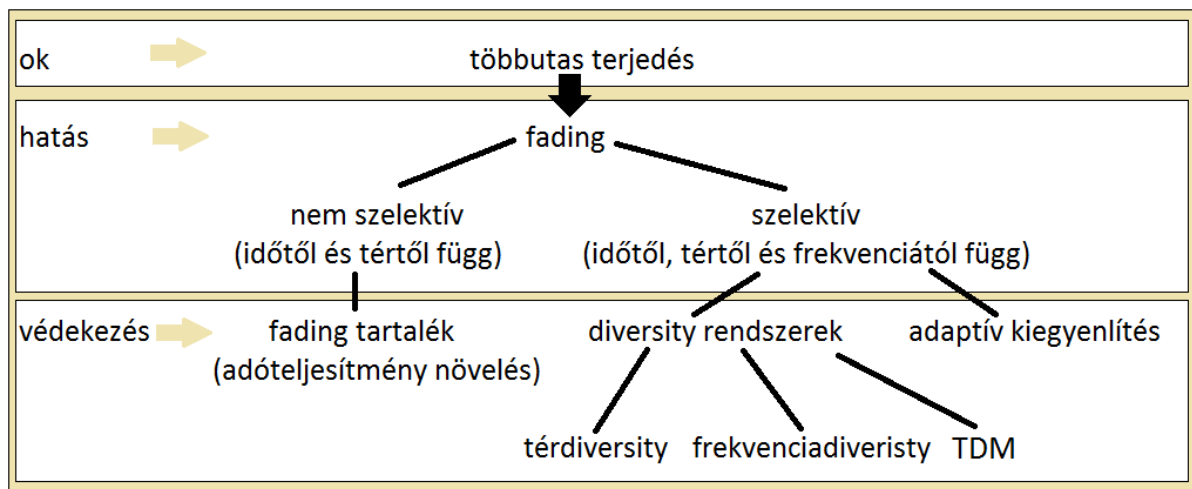


Rayleigh fading: 1 mp alatt is komoly térerősség-ingadozás figyelhető meg a vevőantenna jelében.

Digitális rendszerekben másképp védekezünk a fading ellen. Az OFDM (ortogonális FDM) olyan multiplexálási eljárás, amely során az eredeti nagy adatsebességű adatfolyamot több ezer kisebbre darabolunk szét. Egy vivőfrekvencia helyett sok ezer alvivő létezik, amelyek az információ kisebb szeleteit hordozzák. Ha a fading miatt ezekből az alvivőkből kiesnek néhányan, a hibajavítás segítségével a többi adatból a teljes adatfolyam jó eséllyel rekonstruálható. Felfoghatjuk a dolgot egyfajta soros-párhuzamos átalakításnak is. Az alvivők matematikailag egymással kölcsönösen ortogonálisak (merőlegesek). Az OFDM átvitelt az

alvivők ortogonalitása különbözteti meg a hagyományos FDM eljárásoktól. Egyetlen átvitt adat szimbólum idő alatt ortogonális villamos rezgések százait, ezreit multiplexálja, és viszi át a rendszer. Ezzel a módszerrel a részcsatornák, ill. az alvivők adatátviteléhez tartozó szimbólumidő az eredeti szimbólumidő többszöröse lesz, ezáltal a részcsatornák átvitele ellenállóbb a csatorna többutas hullámterjedés okozta időszórásával és a zajokkal szemben. Az OFDM nem moduláció, hanem modulált alvivők megfelelő összefogása és multiplexálása.

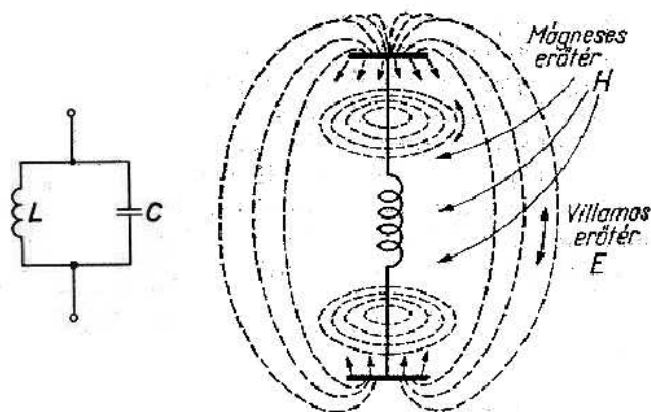
A valóságos esetekben a többutas rádiócsatorna erős szimbólum közötti interferenciát okoz a nagy adatátviteli sebességű és a szélessávú alkalmazások számára, amelyet figyelembe kell venni a rádió átviteli-rendszerek, így a megfelelő fejlettségű katonai rendszerek tervezése és megvalósítása során. A rádiócsatorna tulajdonságai (frekvencia szelektivitás és a mozgás következtében időbeli szórás), és megfontolások arra ösztönöztek, hogy a jelenleg rendelkezésre álló csatornamegosztást nyújtó hozzáférési technikák (FDMA, TDMA, CDMA) mellett, ezek tulajdonságai, előnyei, és az újabb igények (mobil multimédia, szélessávú alkalmazások, fokozott biztonság) alapján, *más átviteli és többszörös hozzáférési eljárást keressenek*. Ebbe az irányba terelte a kutatókat az is, hogy jelentősen nőtt az igény az átvitt információk biztonsága és a fokozott titkosítás iránt is. Ezek az OFDM többszörös hozzáférési eljárásához vezettek, amely a mobil 4G rendszerekhez is megfelelő jelöltnek tűnik.



8. Antennák

Az antenna, definíció szerint az elektromágneses hullámok adására és vételére alkalmas eszköz. A tápvezeték keresztül elektromos hullámot továbbít. A rádiócsatorna a vevő és az adóantenna közötti közeg, ahol a rádióhullám terjed (a csatorna zajos!).

Korábbi tanulmányainkból tudjuk, hogy nyugvó villamos töltések elektromos teret, azonos sebességgel áramló (DC) töltések pedig mágneses teret hoznak létre. Gyorsuló (sebességét és/vagy irányát változtató) töltések AC áramot és elektromágneses teret indukálnak. Rezgőkörökben is ilyen tér jön létre. Ha a rezgőkör zárt, a szóródás kicsiny. Ha egy ilyen rezgőkörben a kondenzátor fegyverzetét egymástól eltávolítjuk, nyitott rezgőkört kapunk. Az elektromágneses hullámok azonban ilyenkor könnyebben kilépnek, és a környezetben terjedhetnek, azt rezgésbe hozhatják. Ilyenkor (közel fénysebességű) elektromágneses hullámterjedés fog létrejönni. Az antennák ilyen nyitott rezgőkörök.



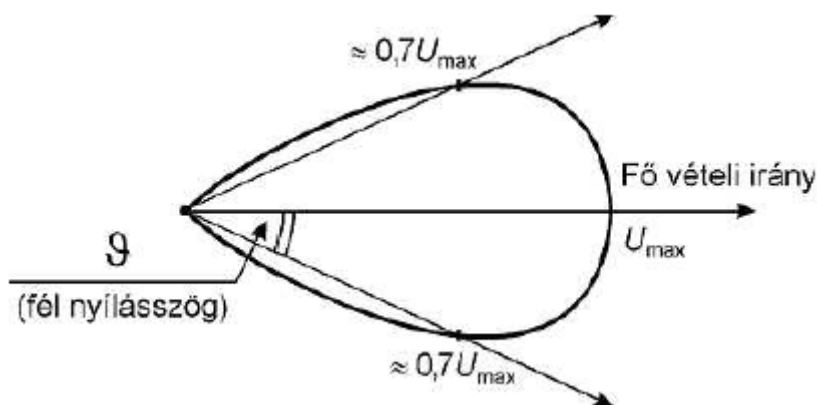
Zárt és nyitott rezgőkör.

A szakaszcsillapítás az egyik legfontosabb paraméter: $a_{sz}=10\log(P_{be}/P_{ki})$, azaz az adóantennába betáplált és a vevőből kivehető maximális hatásos teljesítmény aránya.

Irányított (anizotróp) egy antenna, ha a sugárzás erőssége eltérő az adott irányokban (iránykarakterisztika). A többség ilyen, csak elviekben létezik izotróp antenna, amely ideális pontsugárzó és minden irányban azonos teljesítménnyel sugároz. Az antenna tehát térbeli szűrő: az iránykarakterisztika súlyozza a teljesítményt. Ennek megadása lehet három- vagy kétdimenziós. A gyakorlatban 3D helyett 2D vetületet adunk meg (főnyaláb, melléknyalábok). A főnyaláb fokban megadva általában elégséges (3 dB-es pontok által kirajzolt vonal).

Az irányított antenna lényege, hogy egy adott fő sugárzási irányba koncentrálja az energiát. *Antennanyereségnek* nevezzük azt a dB-ben megadott teljesítményviszonyt, amely megadja, hogy a főirányba kisugárzott teljesítménysűrűség hányszorosa az ugyanabba az irányba sugárzó izotróp antennáénak (azonos táplálás mellett). Például a félhullámú dipólnak kb. 2 dB a nyeresége az izotróphoz képest.

Az antenna *nyílásszöge* megadja, hogy az antennát (mindkét irányban) elforgatva a főirányától, mikor érjük el a -3 dB-es (feszültség dB) jelhatárt. Ez kb. a feszültség 70%-a. Ahhoz, hogy az adóantenna félteljesítményű határát érjük el, a nyílásszög kétszereséig kell elfordítani (-3 dB, teljesítményviszony). A nyílásszög megadása két merőleges síkmetszettel történik.



Antenna nyílásszöge.

Az ERP (Effective Radiated Power) jelentése: effektív kisugárzott teljesítmény, az antenna fő sugárzási irányában:

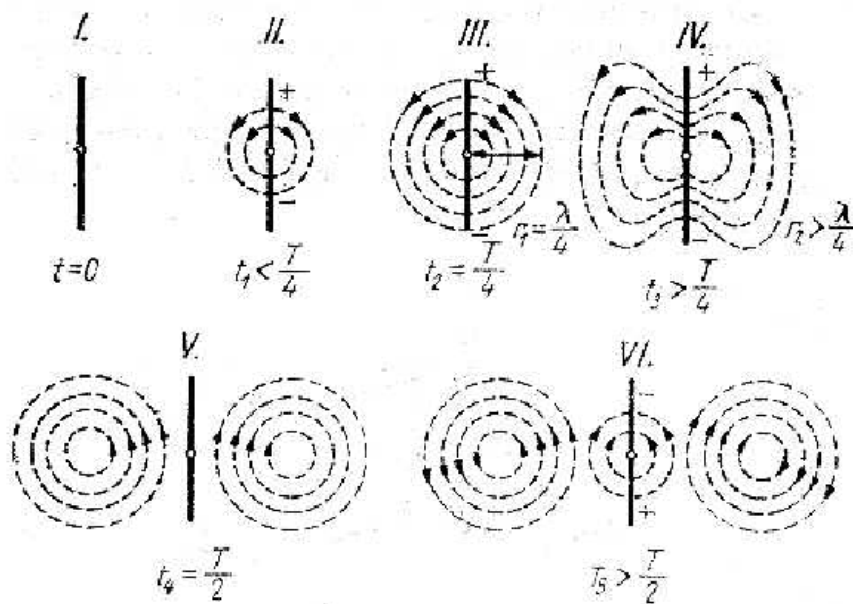
$$ERP = \text{adóteljesítmény} - \text{kábelveszteség [dB]} + \text{antennanyereség [dB]}.$$

Ha az adó teljesítménye 100 Watt, a kábelveszteség 1 dB, a nyereség pedig 11 dB, akkor összességében 10 dB-el javul a végeredmény (1 kW).

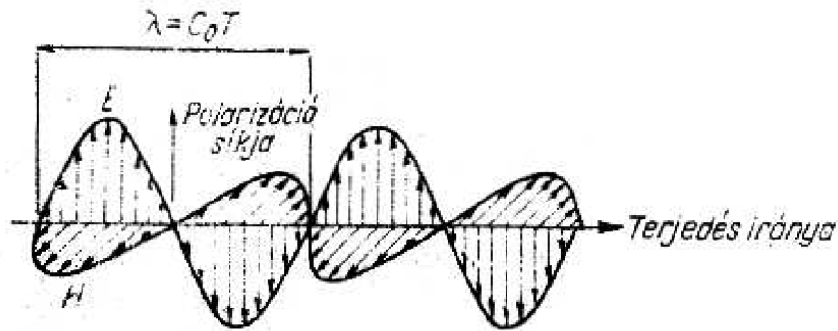
További fontos jellemzői egy antennának:

- Irányhatás: főirányban kisugárzott teljesítménysűrűség/az azonos teljesítményt kisugárzó izotróp antenna teljesítménysűrűsége.
- Sáv szélesség: a 3 dB-es pontok határa főiránytól kitérve. Minél nagyobb az antenna felülete, annál nagyobb a sáv szélessége.
- Antenna hatásfoka: nyereség/irányhatás.
- Előre/hátra viszony: hány dB-el nagyobb a vétel a vevőantennában, amely szembe néz az adóval, mint abban, ami háttal néz az adónak.

A *dipól* antenna az egyik legalapvetőbb antennatípus. Két pólusból áll, mint egy szétnyitott kondenzátor. A két fegyverzet az antenna két fél rúdja (pólusa). Ez a furcsa kondenzátor kezdetben töltetlen. Ha egy T periódusidejű rezgés tölteni kezdi, az első fázisban ($t < T/4$) a felső ág pozitív, az alsó negatív lesz. A kialakuló töltés a $t = T/4$ időpontban maximális értékű. Ezután ($t > T/4$) a töltés csökkenni kezd és az erővonalak $t = T/2$ időpontig összehúzódnak. A töltés $T/2$ -ben megszűnik és a töltésnek nem lesz kapcsolata az antennával, leszakad arról. $T > T/2$ után megkezdődik az antenna ellentétes felpolarizálása, amely ezt a bezárult erőteret magától eltaszítja és az fénysebességgel terjedni kezd. A λ hullámhossz, a c terjedési sebesség ($3 \cdot 10^8$ m/s) és az f vivőfrekvencia közötti kapcsolat: $c = f\lambda$.



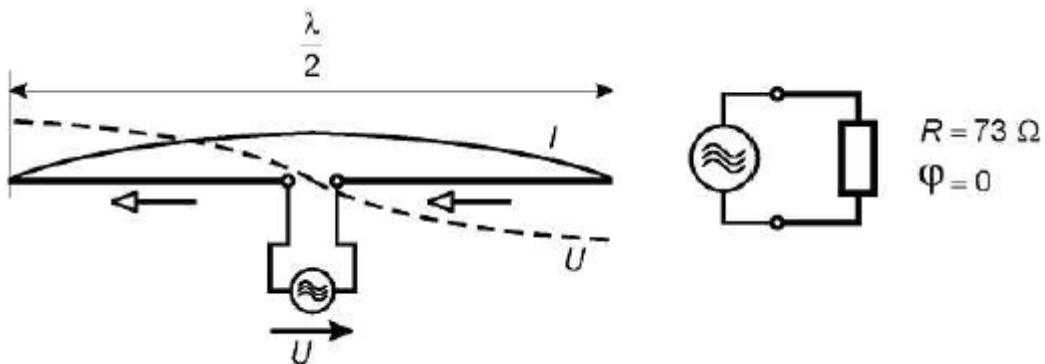
Az elektromos erőter „leszakadása” az antennáról T periódusidő esetén.



Az egymásra merőleges E és H erőter terjedéskor.

A villamos tér mellett mágneses is kialakul, hasonlóan hagyja el az antennát, de síkja merőleges a másakra. Az elektromágneses hullám erősségét a *villamos összetevő* nagyságával adjuk meg (V/m). Ez a térerősség fordítottan arányos a sugárzótól (adóantennától) mért távolsággal és arányos a kisugárzott teljesítmény négyzetgyökével. A sugárzás polarizációja megegyezés szerint egyenlő a villamos erőter polarizációs síkjával. Ez azért fontos, mert a vevőantenna akkor ad le maximális teljesítményt, ha polarizációs síkja megegyezik a sugárzott jelével. Bizonyos terjedések esetén, általában rövidhullámon, a visszavert jelek megváltoztatják a polarizációs síkjukat, itt ezért mindegy az antenna helyzete. Pont-pont közötti URH adás esetén azonban ez jelenős.

A dipólantennát gyakran *félhullámú dipólnak* nevezzük, amelyet középen táplálunk. Az antenna azon a frekvencián rezonál, ahol a hullámhossz éppen az antenna hosszának kétszerese. Rezonancia van minden egészszámú félhullám többszörösénél, de nem mindegy, hogy az páratlan vagy páros egész szám. A félhullámú a lehető legkisebb méret, ami használható.

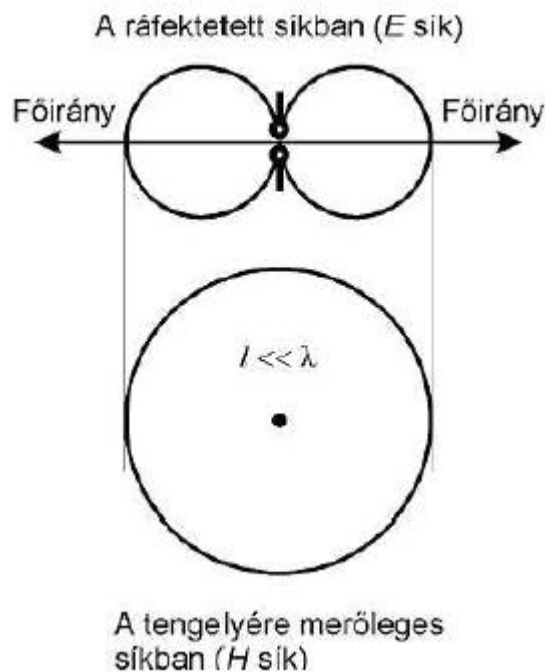


Középen táplált félhullámú dipól feszültség- és árameloszlása.

A rezonáló antenna hossza mentén az (RF) áram és a feszültség változik. Mivel az áram nem folyhat ki az antennából (nincs vezető), ott áramminimum van, és mivel a feszültség ehhez képest 90 fokkal van eltolva, ennek az antenna végén maximuma van. A táplálásnál, a dipól felénél ez épp fordítva van. A rezonanciafrekvencián az impedancia ohmos (valós) és meglehetősen kis érték. (Ennek oka, hogy a táplálási pontban feszültségminimum és árammaximum van, tehát az u/i hányados kicsi lesz.)

Az antennák további fontos paramétere a *talpponti ellenállás* ill. impedancia. Az antenna bementére kapcsolt RF feszültség és RF áram fázisban van, ha az antenna rezonanciafrekvenciáján dolgozunk. Ekkor csak valós ($U \cdot I$), hasznos teljesítmény lép ki, az antenna valamekkora ohmos ellenállást mutat (U/I). Ezt az ohmos ún. talpponti ellenállást látja az adó, mint lezárást. Ha a rádióadó kimentei ellenállása megegyezik az antenna talpponti

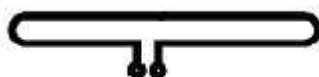
ellenállásával, *illesztett* lezárásról beszélünk. Ha nem az antenna rezonanciafrekvenciáján dolgozunk, akkor az U és az I között fáziseltérés fog fellépni. Ekkor a hányados sem ohmos, hanem induktív vagy kapacitív összetevőket is fog tartalmazni, ez a talpponti impedancia. Ilyen esetben a szükséges illesztés eléréséhez az antennát az ún. antennaillesztővel „ki kell hangolni”, azaz a reaktív komponenseket ki kell egyenlíteni benne. Egy nagy adóantenna több adó frekvenciáján is sugározhat, amiből legfeljebb az egyik lehet ténylegesen illesztett! Ha az antenna túl rövid (ekkor rezonanciafrekvenciája túl magas), akkor vele sorbakapcsolt tekerccsel dolgoznak; ha az antenna túl hosszú, akkor kondenzátort kapcsolnak vele sorba és így „rövidítik”, emelik a rezonanciafrekvenciát. Ez a talpponti impedancia függ a típustól, mérettől, fölfelszín feletti magasságtól stb.



A dipól sugárzási karakterisztikája.

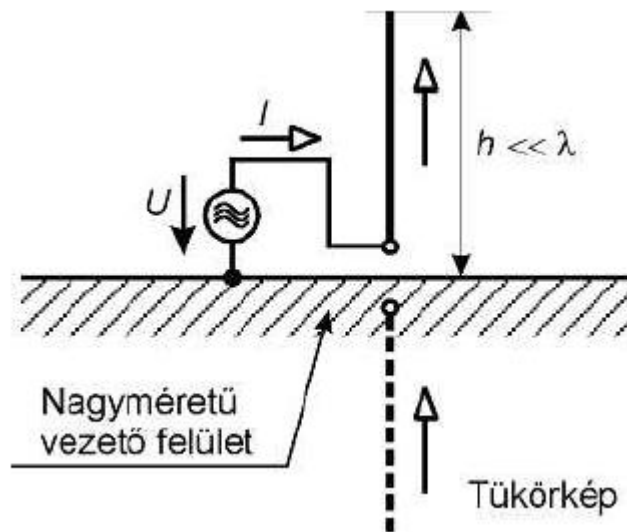
A dipól a ráfektetett síkban „nyolcas” sugárzó, míg a rá merőleges síkban körsugárzó (utóbbi csak a Földtől nagy távolságban igaz). A dipólt lehet az egyik végén, az áramminimumnál is táplálni.

Hasonló módon, két félhullámhosszú vezetőt párhuzamosan kötve, meghajlítva ún. hajlított vagy hurok dipóllhoz jutunk. Mivel a felső vezeték felénél feszültségminimum van, itt az antenna földelhető, tartórúdra is erősíthető. Ez villámvédelmileg jó, rövidhullámon előszeretettel alkalmazzák. Az antennaáram a két ágban megoszlik, feleződik, ugyanakkor a feszültség a két ágból a táplálási pontban összegződik, ettől az impedanciája négyszerese lesz a fentihez képest. A sugárzási karakterisztika lényegében változatlan marad.



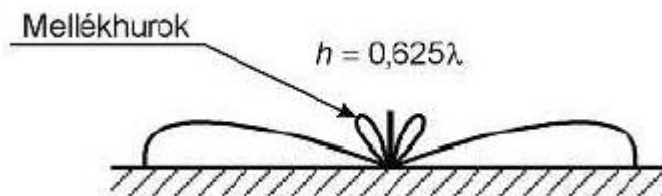
Hajlított dipól.

Ha egy dipól egyik ágát függőlegesen egy jól vezető felület fölé helyezük (pl. a Föld), akkor egy ún. monopólust kapunk. A vezető felület ilyenkor „tükröként” viselkedik, a kibocsátott hullámot ezek együttese határozza meg.



Negyedhullámú monopólus.

Az ilyen monopólus a tükörképével együtt megfelel egy ugyanekkora dipólusnak. A monopólus aszimmetrikus antenna melyet a föld és az antenna alja között táplálunk (illetve olvasunk ki). A félhullámú dipólusnak a negyedhullámú monopólus felel meg. Az ilyen vízszintes irányban körsugárzó. Tekintettel arra, hogy a föld vezetőképessége sok mindentől függ, a talaj szintje alá ún. radiálokat telepítenek, amely egy kifeszített fémháló, legalább negyedhullámhossz sugárban. Ha nem a föld felett van az antenna, hanem magasabban, akkor is szoktak hasonló hálót létrehozni (földelt síkú, groundplane antenna). Jegyezzük még meg, hogy nem csak a negyedes és a feles antenna a jó antenna. Például az $5/8$ -os ($0,625\lambda$) magasságú antenna sugárzási karakterisztikája a leglaposabb, távolra elvisz, de melléknyalábok alakulnak ki (a $0,58$ -as antenna kevésbé laposabb, de épp nem keletkeznek melléknyalábok).



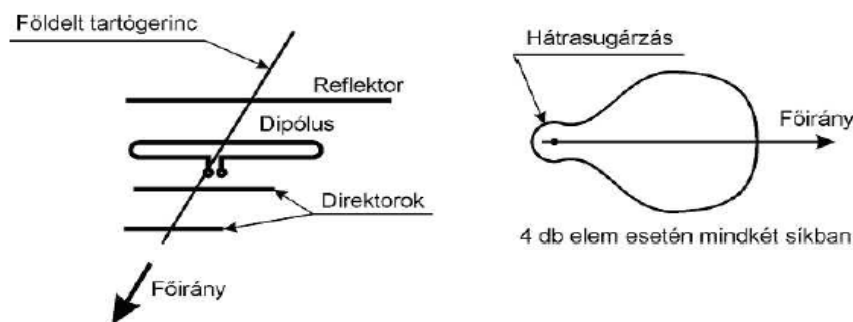
Az $5/8$ -os antenna sugárzási karakterisztikája.

Nem csak az ideális $\lambda/2$ antennák, hanem mivel azok nagyon magasak is lehetnek, $\lambda/4$ -es vagy más arányú antennák is használhatók, mint pl. a fent említett groundplane változat. Az is lehet, hogy már a $\lambda/4$ is túl magas lenne (általában a vevőben). Ez nem az üzemi frekvencián rezonál, és talpponti ellenállása kapacitív összetevőt is tartalmaz, amelyet egy induktivitással kompenzálnunk kell, hogy a talpponti ellenállás valóssá váljon (ún. hosszabbító tekercs). A tekercs nem vagy csak kismértékben sugároz, valamint csökken az antenna hatásfoka és sávzélessége. A magasságot úgy is csökkenthetjük, hogy ún. tetőkapacitással terheljük az antenna végét. Ezzel csökkentjük az antenna rezonanciafrekvenciáját, mint ahogyan a közönséges rezgőkörökben is a kapacitás megnövelése csökkenti a frekvenciát. A túlságosan rövidre méretezett sugárzókat is rezonanciára bírhatjuk így. A terheletlen függőleges antennákhoz képest az ilyen antennának nagyobb a sugárzási ellenállása, tehát jobb a hatásfoka, de a sugárzási karakterisztika torzulhat.

Leegyszerűsítve fogalmazva, a félhullámú antennával minimalizáljuk a reflexiókat és a reaktív komponenseket, ezzel maximálva a teljesítményt. Az ilyen antenna két karja negyedhullámhossz hosszúságú; közepén táplált. A negyedhullámú változat a földet (és alatta lévő vezető felületet) használja a dipólus másik felének. Az antenna rezonáns, mert a földben lévő vezetőréteg tükörként viselkedik az áram számára. A talpponti (valós) ellenállás értéke 35-60 Ohm körüli, könnyen illeszthető az 50 Ohmos rendszerekhez. Ez a legegyszerűbb formája a vertikális antennáknak, ahol az antenna hatékonysága annak hosszához viszonyítva a legnagyobb.

Az antenna tehát egy oszcilláló áramkör, és mint minden rezonáns áramkör, ráhangolható adott rezonanciafrekvenciára. Ekkor állóhullámok oszcillálnak rajta, amelynek áram-csomópontjai (nullpontjai) vannak a végeken. Ez minden $\lambda/2$ egész számú többszöröse esetén igaz - ebből a legkisebbet érdemes használni. Ha valamilyen "tört számú lambda" az antenna hossza, hozzá kapcsolt kapacitás vagy induktivitás alkalmas arra, hogy "meghosszabbítsa" és az állóhullámú oszcilláció kialakuljon. Az iránykarakterisztika azonban függ a hosszától, így előnyös lehet a törtlambdás megoldás.

Ha az antenna irányhatása fontos, a dipól antennát feljavíthatjuk úgy, hogy vele azonos síkban, párhuzamosan parazita, táplálás nélküli vezetőelemeket helyezünk el. A félhullámnál valamivel hosszabb reflektort az egyik, míg a félhullámnál valamivel rövidebb direktorokat a másik oldalán rögzítjük. Ezek parazita (nem táplált) elemek. Utóbbiak mennyisége határozza meg az irányítottságot. Ezt az antennatípust Yagi-antennának nevezik. A négyelemes nyeresége kb. 6-10 dB, nyílásszöge 30-40 fok.



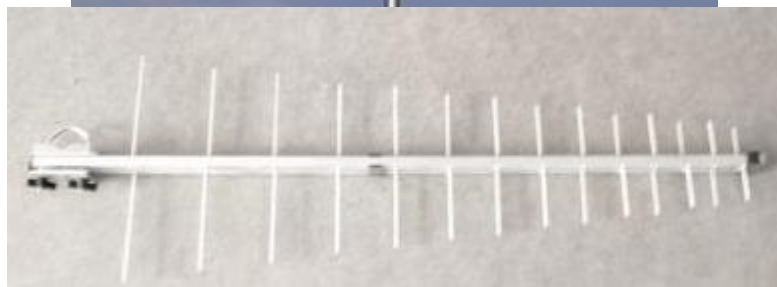
Yagi antenna és sugárzási karakterisztikája.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	DL6WU yagi design tool							
2								
3	Inputs:							
4	Title	70cm yagi						
5	Dimension unit	inch						
6	Frequency	432.0 MHz			Element	Position	Spacing	Length
7	Parasitic element diameter	0.185 inch			(inch)	(inch)	(inch)	
8	Driven element diameter	0.185 inch		R	0.50	0.50	13.68	
9	Boom diameter	0.75 inch		DE	5.96	5.46	13.07	
10	Boom correction (B/I/N)	Bonded		D 1	8.01	2.05	12.24	
11	Reflector offset	0.5 inch		D 2	12.93	4.92	12.08	
12	Elements	18		D 3	18.81	5.87	11.93	
13				D 4	25.64	6.83	11.79	
14				D 5	33.29	7.65	11.67	
15	Calculated values:			D 6	41.48	8.20	11.57	
16	Wavelength	27.32 inch		D 7	50.09	8.61	11.47	
17	Dimensional tolerance	0.08 inch		D 8	59.10	9.02	11.39	
18	Boom length	143.48 inch		D 9	68.53	9.43	11.32	
19	Gain	16.9 dBi		D 10	78.37	9.84	11.25	
20	Beamwidth - H plane	28.2 °		D 11	88.61	10.25	11.20	
21	Beamwidth - E plane	27.0 °		D 12	99.27	10.66	11.14	
22	Stacking dist - H plane	56 inch		D 13	110.20	10.93	11.09	
23	Stacking dist - E plane	59 inch		D 14	121.12	10.93	11.05	
24				D 15	132.05	10.93	11.00	
25				D 16	142.98	10.93	10.97	
26								
27	Version: 2.01							
28	30-Jul-2006							
29	Copyright: Owen Duffy 2006.							
30	Support: http://vk1od.net/dl6wu							

Egy Yagi antenna tervező program Excelben. Az adatok beállítása után az egyes elemel mérete és a sugárzási paraméterek (kék háttér) számítható.

Hasonló, gyakran alkalmazott antennatípus a logper antenna. Nevét onnan kapta, hogy elemei „logaritmikusan periodikusak”, hosszuk és távolságuk változása logaritmikus. Az ún. LPDA (logper antennatömb) félhullámú dipólemek sorozatából áll. Mindegyike egy pár fémrúd, amelyek az antenna tengelye mentén fekvő tartószerkezet (gém) mentén helyezkedik el. Az elemek elosztása a frekvencia logaritmikusát követi (szigma-függvény). Az egymást követő elemek hossza a gémmel fokozatosan csökken (tau-függvény). E kettő az LPDA tervezés legfontosabb elemei. Az antenna sugárzásának fő lebenye a gémmel tengelye mentén helyezkedik el, a végén a legrövidebb elemekkel. Mindegyik dipólem rezonáns, azaz táplált (ellentétben a Yagival). Az antenna sávzélessége megközelítőleg a leghosszabb és a legrövidebb elem rezonáns frekvenciái között van.

A Yagi és az LPDA formatervezése első ránézésre nagyon hasonlónak tűnik, mivel mindkettő számos dipólusból áll, amelyek egy tartószerkezet mentén vannak felszerelve. A Yagi-nak azonban csak egyetlen hajtott eleme van összekötve a távvezetékkel. Ha elemeket adunk a Yagihoz, irányítottága és nyeresége nő, a logpernek a sávzélessége.



Fent: szélessávú VHF, alul UHF logper antenna.

Nagyon magas frekvencián és mikrohullámon a fenti antennatípusok nem megfelelőek. Ilyenkor paraboloid tükröt használunk, ahol a vevőegység annak fókuszpontjában van, ide akár dipólantennát is tehetünk. A valóságban ezen alaptípusokon kívül számtalan antennafajttával találkozhatunk.



UHF „nagylepké” Tv antenna



43 elemes, UHF szélesávú Yagi antenna



Hélix antenna, 2,4 GHz, mikrohullám.

Az adó vizsgálatokor gyakran az antennát egy a talpponti ellenállásával megegyező műterheléssel vizsgálják. Ezen a rádiófrekvenciás teljesítmény hővé alakul. Tápvonalnak hívjuk a RF jel továbbítására alkalmas közeget, ami lehet egyszerű vezeték, általában koax kábel, csavart érpár, vagy éppen adott átmérőjű cső. Az köti össze az adót ill. a vevőt az antennával. Szimmetrikus rendszerben, a vezető mindkét vezetéke földfüggetlen, a jelet a két vezeték között mérjük, azok felcserélhetők. Aszimmetrikus vezetéken a hasznos jelvezeték földelt árnyékolást kap (koaxiális). A tápvonal a jelet csillapítja (ohmos veszteséget okoz) és lehet kapacitív valamint induktív tulajdonsága is, azaz együttesen impedanciája. Mivel egy – elméletileg – végtelen hosszú tápvonal csillapítása végtelen és a végén nem jön ki feszültség, az ilyen tápvonal bementi impedanciáját a lezárástól függetlenül a saját L , C paraméterei határozzák meg. A végtelen hosszú tápvonal bementi impedanciájának neve: *hullámimpedancia*. Kellően magas frekvencia felett a komplex, frekvenciafüggő hullámimpedancia ohmossá válik. Például a koax-vezetékek közül 75 és 50 ohmos is megtalálható, egyiket számítógéphálózathoz, másikat kábeltévéhez használjuk. Figyelem, az így megadott ellenállásérték nem a vezeték hosszától függ, hanem attól függetlenül, a kábel milyenségére jellemző! Belátható, hogy egy véges, l -hosszúságú vezetőt, ha hullámimpedanciájával zárjuk le, akkor annak bemenő impedanciája is a kábelre jellemző

hullámimpedancia lesz. Ez antennáknál úgy jelentkezik, hogy a rádióadó kimeneti ellenállása meg kell egyezzen az antennáig elvezető tápvonal hullámimpedanciájával, az pedig az antenna talpponti impedanciájával. Ekkor optimális, illesztett a rendszer. Mikrohullámú alkalmazásokban a csőtápvonalat használunk, amelyben szinte csillapítás nélkül terjed a jel. Villamosságtani szempontból közelítve, a hullámimpedanciával lezárt tápvonal végéről nem verődik vissza „ellenhullám”, amely az alkalmazások szempontjából jelentős. Ha nem ilyen a lezárás, akkor haladó és reflektált hullámok találkoznak a tápvonalon, adott pontban a feszültséget vektoriálisan (fázishelyesen) kell összegezni. A feszültség képét a tápvonal mentén felrajzolva, tipikus állóhullámképeket kaphatunk. Ahol azonos fázisú a reflektált és a haladó hullám, ott feszültség maximumot kapunk, ahol ellenfázisú, ott minimumot. A maximális és minimális feszültség arányával definiáljuk a *feszültség állóhullámarányt* (SWR, Standing Wave Ratio).

$$SWR = U_{\max}/U_{\min} = (U_{\text{haladó}} + U_{\text{reflektált}})/(U_{\text{haladó}} - U_{\text{reflektált}}).$$

Ha a lezárás illesztett, nincs reflektált hullám, $SWR = 1$, illesztetlenség esetén mindig pozitív, egynél nagyobb, rövidzár ill. szakadás esetén végtelen. Az r -reflexiótényezővel kifejezve:

$$SWR = (1+r)/(1-r)$$

ahol

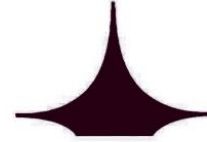
$$r = P_{\text{reflektált}}/P_{\text{haladó}}$$

Mivel a visszavert hullám teljesítménye az adó kimenő fokozatára jut (nem kerül kisugárzásra), tönkretelheti azt! Az adóban meg van adva, mekkora SWR-ű tápvonal és antenna kapcsolható rá. Az állóhullámarány mérésére léteznek eszközök, amellyel „rámérhetünk” a tápvonalra, és az SWR értékéből következtetést vonhatunk le a lezárásra vonatkozólag.

Magyarországon a lakihegyi „szivarantenna” és a solti torony a legismertebb műsorszóró rádióadó. A hetvenes években a 135 kW-os lakihegyi adó középhullámú sugárzása kevés lett a sok zavaró adás hatására. Ezért megépült az ország geometriai középpontjában a solti 2 MW-os adó. Ez egy 300 méteres antennából és két 1 MW-os szovjet adóból állt, és lehetővé tette az országos lefedettséget a Kossuth Rádió számára. 2017-ben ünnepélyesen átadták a felújított állomást, energiahatékony, távfelügyelhető, DRM kompatibilis kanadai adóblokkal (5 db 400 kW-os félvezetős blokk, egyedi tervezésű összegzővel). Ez a világ legnagyobb teljesítményű félvezetős adója. A lakihegyi torony 1933-1977-ig működött, jelenleg a solti tartaléka. A világháborúban eldőlt, de újjáépítették és felújították, ma műemlék. Magassága 314 m, nyolc feszítőkötél tartja, alatta vezetőháló feszül a talajban.

2006 nyarán alaposan felújították és ismét üzembe helyezték. Fő üzemből 135,6 kHz-en HGA22 jelzéssel a német DCF77-hez hasonló időszinkron jeleket sugároz 100 kW teljesítménnyel, amit az áramszolgáltatók az éjszakai-nappali ellátás közti váltásra, és a közvilágítás kapcsolására használnak fel.

SUPER LINEAR ANTENNA LPA 045



Szélessávú, nagy nyereségű, irányított antenna, 410 - 480 MHz
High-gain , broadband , directional antenna, 410 - 480 MHz

SPECIFIKÁCIÓK Specifications

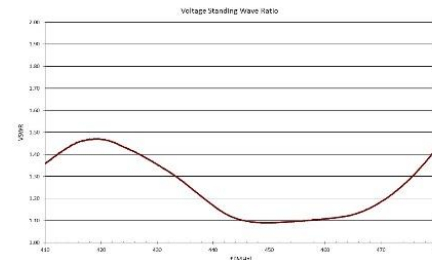
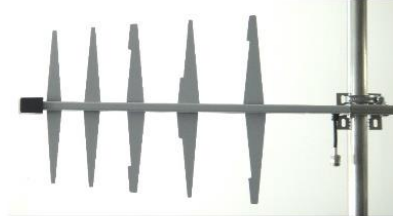
Műszaki paraméterek

Nyereség: Gain:	410 - 480 MHz	max. 9,5 dBi
Frekvencia sáv : Frequency band :	410 - 480 MHz	
VSWR:	< 1.5:1	
Teljesítmény: Power	10 W	
Impedancia: impedance	50 Ω	
Konnektor: connector	N; FME;SMA	
Polarizáció: polarisation	Vertikális	
Irányítottság: directivity	E 80° - H 60°	
E/H viszony: F/B ration	>15 dB	

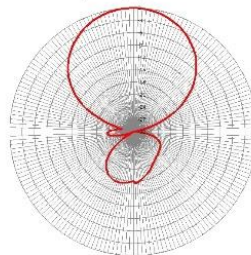
Mechanikai adatok

Antenna gerinc és elemek alapanyaga:	Otvözött alumínium
Material	Aluminium alloy
Tartó bilincs: Clamp	Korrózióálló acél stainless steel
Kábel: Cable	RG 223
Műanyag alkatrészek: Plastic Parts	ABS, Polycarbonat
Árboç átmérő: Diameter mast	30-60 mm
Méretek: Dimension	x x

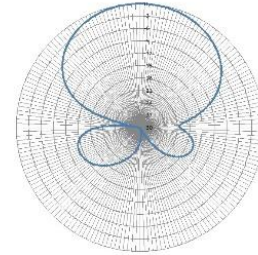
Tesztelve: IEC68-2-1:Ab/Ad
IEC68-2-2:Bb/Bd
IEC68-2-14:Na
IEC68-2-56:Cb
IEC68-2-11:Ka



E-plane in [dB] @ 450 MHz



H-plane in [dB] @ 450 MHz



CARANT® fenntartja a mindenemű változtatás jogát, akár előzetes bejelentés nélkül.
CARANT® We reserve the right to make changes.

CARANT® ANTENNA Kft. | H-9028 Győr, Török Ignác u. 66. | GPS 47:40:24N, 17:39:57E
Telefon: +36 96 516 010 | Fax: +36 96 516 016 | E-mail: carant@carant.hu | Web: www.carant.hu

Egy antennagyártó adatlapja

9. Adattömörítés és hibajavítás alapjai

Ennek a tantárgynak a keretében csak betekintést adunk a digitális kódok világába, elsősorban a tömörítés és hibajavítás megértésének érdekében. A kódelmélet tudománya foglalkozik a kódok matematikai leírásával és felhasználhatóságával. Számunkra annyi most a fontos, hogy milyen alaptípusok találhatók meg, és mi a szerepük a távközlési hálózatokban.

Analóg technikában a hang és a kép élesen elvált az adatátviteltől. Míg előbbi kettő analóg módban, az adat mindig is bináris digitális formátumban volt jelen akkor is, ha ezek keveredtek. Jó példa erre a teletext átvitel bevezetése, ahol az analóg módon jelen lévő kép- és hanginformáció mellé sikerült digitális adatokat betenni, amelyet megfelelő készülékkel dekódolni lehetett. Manapság az analóg FM rádiózás mellé illesztett RDS adatokkal találkozhatunk.

Miután a hang és a kép is digitalizálásra került a CD-n, DVD-n, DVB műsorszórásban, az internetes megoldásokban, lényegi különbség átviteltechnikailag nem jelentkezik: mindhárom bináris adatfolyam, amelynek van adatsebessége, helyigénye (lásd MPEG adatfolyamok).

Már korábban láttuk, a digitális hasznos jel, a nyers adat az, ami a nettó adatfolyamot generálja. Ez önmagában nem alkalmas átvitelre, hiszen maximálisan hibaérzékeny pl. a csatorna rossz jel-zaj-viszonya, visszaverődések stb. okán. Ezért minden esetben szükség van az alábbiakra:

- hibajelzés és -javítás (többféle, akár egyszerre is)
- keretformátum
- szinkron

Ezek együttesét redundanciának nevezzük, és a bruttó adatsebesség megnövekedéséhez vezet. Ez akár többszöröse is lehet a nettó adatsebességnek. A csatornában fellépő hiba ellen kétféle védekezés van:

- a vevő érzékeli és felismeri a hibát, majd visszirányú csatornán jelezve újraküldést kér (hibajelző kódok),
- az adó előre hibajavítással látja el a jelet, amellyel a vevő megkísérli a hibák kijavítását (Forward Error Correction – FEC)

A hibajavítás célja, hogy a véletlenszerűen fellépő 0-1 és 1-0 átmenetek, amelyek hibaként kerülnek elő felismerhetők és részben javíthatók legyenek. A hibáknak alapjában két nagy csoportja van:

- egyedi ún. bithibák
- hibacsomók (börstös hiba)

Az egyedi bithibák véletlenszerűen fordulnak elő, eloszlásuk egyenletes, előre nem jelezhető időben és helyben, hanem „csak úgy”, a hibázó csatorna okozza. Ez ellen *hibajavító kódolást* kell alkalmazni. Ez kötelező, hiszen ha ilyen nincs, akkor a teljes digitális rendszer használhatatlan lesz! A bekövetkező bithibákat akkor sem felismerni, sem javítani nem lehet. Ahhoz, hogy végtelen sok javítható legyen, azaz az átvitel tökéletes legyen és 100% biztonságos, végtelen sok hibajavító bitre lenne szükség: ez megvalósíthatatlan. Éppen ezért minden hibajavító kód csak részben képes hibafelismerésre és javításra. Általánosságban igaz, hogy minél több bitet „pazarlunk” hibajavításra, annál robosztusabb lesz a rendszer, annál érzéketlenebb a hibákra.

A hibák másik típusa a hibacsomó, amely ellen ún. *átszövés* (interleaving) védekezünk. Ez mindig az egyedi hibajavítóval együttműködve dolgozik. A hibacsomó, vagy hibaburst olyan esemény, amikor a bithibák egy kupacban, egymás után következnek. Nem véletlenül és nem egyenletes eloszlásban, hanem előre jelezhető és várható módon. Ennek oka lehet pl. karc a CD-n, vagy egy villámcsapás okozta jelkiesés. Ilyenkor egyszerre nagyon sok, akár több millió bit is meghibásodhat egymás után, és ezzel az egyedi hibajavító nem tud megbirkózni. Az ötlet az, hogy a logikailag (időben) egymás utáni biteket egy meghatározott algoritmus szerint előre összekeverjük, és térben (a lemezen vagy az átviteli úton időben) nem egymás után lesznek. A

meghibásodás így bár lokalizált lesz, de miután a dekóder visszarendezi az eredeti sorrendet, a hibacsomó egyedi hibákra esik szét, ezt pedig az egyedi hibajavító jó eséllyel ki tud javítani. Lássunk példát egyszerű egyedi hibajavításra. A Hamming-távolság megadja két azonos hosszú bináris kódszó kódtávolságát, amely nem más, mint az a szám, ahány bitben eltérnek. Például a 0000 és a 0001 kódszavak között a Hamming-távolság egy. A 0000 és az 1111 között pedig négy. Minél nagyobb ez a távolság, annál több hibát lehet észlelni és javítani. Ha a legegyszerűbb esetben egy bitet akarunk átvinni, akkor ha azt egy biten tesszük, optimálisan használjuk ki a kódot, de hiba felismerésre nincs lehetőség. Ha szeretnénk hibajavítást beletenni, biteket kell hozzáadni. Amennyiben pl. négybités rendszert vezetünk be, és az 1 helyett az 1111 kódszót, míg a 0 helyett a 0000-t használjuk, a vevőbe érkező bármely más kódszó hibát jelez. Ha pl. a 0001 érkezik be, a rendszer felismeri és javítja is a hibát: 0000-ra módosítja, hiszen ez a legvalószínűbb. Ha 0101 érkezik be, a hiba felismerhető, de nem javítható, hiszen azonos valószínűséggel került a 0000 ill. az 1111 kódszóba két bithiba. Sajnos előfordulhat, hogy 3 vagy 4 bithiba is megesik, ekkor a kódszó rosszul kerül dekódolásra, mert a hibajavítás a másik esetre fog dönteni. Ez a legegyszerűbb hibajavítás, ami meglehetősen pazarló a bitekkel, a redundancia és a bruttó adatsebesség nagy lesz.

A legelterjedtebb hibajavító kódolások közül a fenti Hamming-kódot, a konvolúciós kódokat és a Reed-Solomon kódokat érdemes ismerni. A Hamming-kód a legegyszerűbb, bitszámban meglehetősen pazarló, alapegységként a bitet kezelő eljárás. Az RS-kódok sokkal jobban használják ki a bitszámot (kevesebb redundanciát adnak hozzá), és nem bitalapon működnek, hanem szimbólumokat kezelnek, több bitet egybefogva. Speciális eljárás a konvolúciós kód, amely egyszerre szintén több bitet kezel, de azok logikailag is kapcsolatban állnak egymással, általában valamiféle „XOR” kapcsolatban. Ezek a kódolók tehát memóriát is tartalmaznak. Jellemzően pl. hat egymás utáni bit logikai műveletéből állnak elő újabb bitek, amelyek így kapcsolatba kerülnek. A dekódolás elve, hogy csak meghatározott állapotokban lehet a rendszer, és az esetleg visszafejthető. Ilyeneket használnak a kép- és hangtechnikában.

A hibajavítás mellett nagyon fontos, hogy a jeleket keretekre osszuk fel, olyan kezelhető méretű csomagokra, amelyek a szinkronizációt is lehetővé teszik. Gondoljunk bele, egy néhány Mbps sebességű adatfolyamnál több millió bit áramlik másodpercenként! Ha nincs eleje, vége, és belépési/kilépési pontok, az adatfolyam kezelhetetlen lesz. Különösen hibák fellépése után, meg kell találni „mi hol van”. Ezért az ilyen nagy adatfolyamokat meglehetősen kicsi, akár néhány száz, néhány ezer bites kisebb egységekre osztják (keret), amelynek vannak szinkronbitjei, fejléce, tartalomjegyzéke, hasznos adatai és hibajavító bitjei. Ha az átvitel szétesik, a következő kerethez tud a dekóder szinkronizálni és felvenni a fonalat.

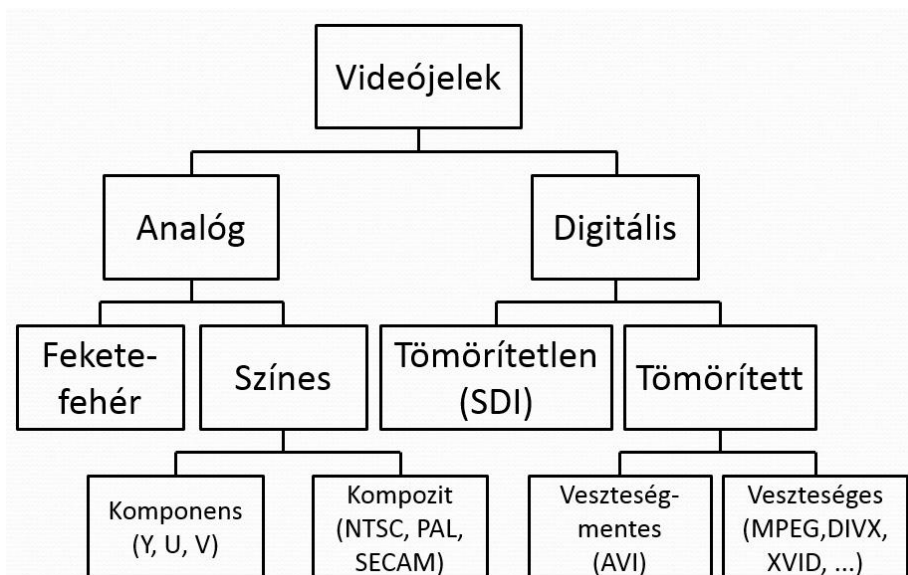
A jel előállítás folyamata tehát az alábbi: az analóg-digitális átalakítás után előálló hasznos bináris jelet valamiféle hibajavítással látjuk el. Ezt követi az átszövő, amely a hibacsomók ellen véd. Az így feldúsított jelet szabványokat követve feldaraboljuk kisebb keretekre, amelyeket fejléccel és szinkronizáló bitekkel látunk el. A dekóder ezeket a lépéseket fejt vissza és végzi el a hibajavítást. Maga az átszövés és annak visszaalakítása nem hibajavítás, csak sorbarendezés! Ezt követően a redundanciával ellátott jel alkalmas kisugárzásra pl. antennán vagy hordozóra írásra. Ehhez megfelelő modulációt alkalmazunk, amely a csatornakódolások csoportjába tartozik. A csatornakódolás a bitfolyamot a csatorna tulajdonságaihoz illeszti: optimálisan megválasztva a modulációt és járulékos hibajavítást az átvitel érdekében. Pl. egy MPEG2 adatfolyammal mást kell tenni ha DVD lemezre írjuk, és megint mást ha DVB-T rendszerben kisugározzuk.

A digitális adatok kezelésének egyik legfontosabb része a *tömörítés*. Az adathalmazok nagyok, már hang esetén is, kép esetén pedig sokszorosa annak, amelyet hordozóra rögzíthetünk vagy kisugározhatunk. Ha nincs hatékony tömörítés, nem lenne digitális műsorszórás, youtube videók, streaming szolgáltatások (és torrentezés...) sem!

A tömörítők két alapvető típusa a *veszteséges* és a *veszteségmentes*. Utóbbi a természetes: a betömörített adatsor bitre pontosan helyreállítható a kitömörítés után. Adatokon csak ezt alkalmazhatjuk (pl. ZIP, RAR stb.). Ennek határfoka azonban kb. 50%, tehát mintegy felére tudják csupán összenyomni az eredeti fájlt. Veszteséges kódolásnál a kitömörített adatok nem fognak megegyezni a betömörítéssel. Ezt az eljárást csak hang és kép adatra lehet alkalmazni (ilyen pl. az MP3, a Dolby Digital, az MPEG4 eljárás stb.). Ennek alapelve, hogy ismerve az emberi érzékszervek (fül, szem) tulajdonságait, bizonyos részek a digitális hangból és képből elhagyhatók, törölhetők, hibák vihetők bele, de ezeket nem fogjuk érzékelni. A határfok elérheti a 80-90%-ot is, azaz akár a tizedére is összenyomható a fájl méret. Ezek összefoglaló neve forráskódolás, érzeti kódolás, pszichoakusztikai/vizuális kódolás. Ezek tárgyalása hosszadalmas, érdekes és a szakirányú oktatás keretében kerül elő.

Veszteségmentes kódolás egyik alapvető és legismertebb fajtája a *futamhossz-kódolás* (Running Length Coding, RLC). Az elve egyszerű: ahelyett, hogy a biteket magukban vinnénk át, az egymás utáni azonos bitek hosszúságát kódoljuk. Ha pl. van 100 db nullás bit egymás után, azt 100 bit helyett úgy vesszük át, hogy „0” és „100 darab”, amely sokkal kevesebb bitet igényel. Természetesen, ennek hatékonysága változó: minél hosszabbak ezek a „futamok”, annál jobb a tömörítés. Legrosszabb a 0-1-0-1-0-1... stb. sorozat, mert ezt nem lehet tömöríteni. Ilyen futamhossz-kódolók majdnem minden eljárásban részt vesznek, pl. a JPEG vagy MPEG kódolások során is.

Egy másik nagyon gyakori veszteségmentes eljárás a *Huffman-kód*. Ez az egyes karakterek (jelek, betűk, számjegyek) olyan kódolását jelenti, amelyben az egyes kódok nem azonos hosszúságúak (különböző számú bitből állnak) annak érdekében, hogy a szövegek átlagosan rövidebbek legyenek, mint az azonos hosszúságú kódok használata esetében. Ez a karakterek gyakoriságának figyelembe vételével történik: azok a kódolandó karakterek és bitsorozatok, amelyek gyakoriak, rövidebbre lesznek cserélve, a nagyon ritkák pedig hosszúra. Előállhat olyan eset, hogy pl. négybites kódszavak eloszlását figyelembe véve a gyakoriak 2 bittel, az átlagosak 3-4 bittel, a nagyon ritkák meg 6 bittel lesznek leírva. Lényeg, hogy az így eredő bitsebesség kisebb legyen az eredetinel.



Összefoglaló blokkdiagram

10. Szélessávú infokommunikáció

Szélessávú infokommunikációs szolgáltatásokat vezetékes, vezeték nélküli (rádiós) és ezek kombinációjával hozhatunk létre. Jellemzője, hogy a vezetékes részekben optikai szálak és berendezések (is) működnek. Az ország lefedéséhez kormányzati és EU szintű beruházások is szükségesek. Magyarországon 2008 végén kb. 15%-os volt a szélessávú lefedettség, amely az EU 20%-os átlagához képest közepesnek mondható. 2020-ra Magyarország a szélessávú lefedettségben, különösen mobil 4G esetén az élvonalba tartozott, de az átlagos fel- és letöltési sebességek is jónak mondhatók. A tervezéskor figyelembe kell venni az adott ország sajátosságait (népesség, települések mérete, elhelyezkedése, földrajzi viszonyok). A szolgáltatások nagyon sokrétűek lehetnek, amelyeket az alábbi szintekbe szoktunk sorolni:

1. Multimédia szolgáltatási képességű hálózat, amely internetet, telefont és valamilyen felbontású digitális mozgóképátvitelt tesz lehetővé egyidejűleg (ún. „triple play”).
2. Alapszintű szélessávú internetszolgáltatás, ahol a multimédia elérés az adott helyen nem valósítható meg. Itt is a 2 Mbps sebesség a megcélzott.
3. Mára megjelentek a gigabites hálózatok, amelyek Gbps feletti sebességet ígérnek, jórészt üvegszálal vezetékes és 4G, de inkább 5G hálózatokon.

10.1 Szélessávú hálózati technológiák

A következőkben összefoglaljuk azokat a szélessávú technológiákat, amely a tervezésnél szóba jöhetnek.

A szélessávú gerinc- és körzethálózati technológiák legfontosabb részei a DWDM, az optikai Ethernet linkek, az SDH, pont-pont mikrohullámú összeköttetések és a VSAT rendszerek. Ide tartozik tehát minden olyan technológia, amely a hozzáférési hálózatok (a LAN-t is) forgalmát koncentrálna továbbítja más hálózathoz. Feltehetőleg optikai alapú, amennyiben vezetékes.

- A DWDM (nagyűrűségű hullámosztásos multiplexálás) rendszerű optikai hálózat két pontja között egy szálon egyszerre, több hullámhosszú fényvel lehet kommunikálni. Minden hullámhossz megfelel egy csatornának (2 – 10 Gbps). Több száz ilyen csatorna lehetséges, így Tbps-ot is el lehet érni optikai feldolgozással.
- Az optikai Ethernet lehet FE (Fast Ethernet) 100 Mbps vagy gigabites (GE 1-10 Gbps).
- A szinkron digitális hierarchia (SDH) mindig optikai szálú, de előfordul mikrohullámú rendszerekben is (155 Mbps – 40 Gbps). Jól működő, széles körben használt rendszer.
- Pont-pont közötti mikrohullámú összeköttetést a föld felszínén lehet alkalmazni, egyszerűen, olcsón, gyorsan telepíthető, de kisebb az adatsebesség, mert a csatorna kevésbé megbízható (2 – 140 Mbps).
- A VSAT (Very Small Apertura Terminal) kétirányú műholdas kapcsolatot hoz létre, kisméretű paraboloid antennával, geostacioner műhoddal. Azonnal, bárhol használható, földi telepítés nem kell.

A vezetékes hálózati technológiákat a hordozó szerint osztályozzuk (sodrott érpár, kábel, fényvezető). Ilyen a DSL, a KTV, az FTT.

- A DSL (Digital Subscriber Line), a digitális előfizetői vonal telefonhálózatot használ az internet elérésére. Sodrott érpárok 40%-án lehet ilyen létrehozni, ha az igény ennél nagyobb, optikára lesz szükség.

- A KTV, kábeltévés modemes ellátás. Ezek a hálózatok általában optikai fővonalból és koaxiális végelosztókból állnak. Internet és telefonellátás is megoldható, de a vissz irányú kommunikációhoz egy külön modem szükséges, csillagpontos hálózati struktúra, valamint kétirányú erősítők. Az adatkommunikáció a DOCSIS szabvány szerint történik, amellyel 55 Mbps letöltési és 10-30 Mbps feltöltési sebesség érhető el. A DOCSIS 3.0 három nyolc MHz-es kábeltévé csatorna összefogásával, a keletkező 24 MHz-ben a több száz Mbps sebességet is elérheti.
- Az FTTH (fiber to the home, fiber to the building) azt jelenti, hogy az előfizető gépéig optikán érkezik a jel. Lehet azonban rézvezetős, hibrid megoldást is készíteni, mert az eljárás drága. Az optikai elosztók lehetnek passzívok vagy aktívok.

A vezeték nélküli hálózati technológiák a mobil, a CDMA, az FWA, a műholdas és a WLAN rendszerek. A második generációs GSM átviteli lehetőségek között a GPRS (114 kbps) még nem számít szélessávúnak. A 2.5G-nek nevezett EDGE már 384 kbps, átmenet a szélessáv felé. A 3G (UMTS) már 2 Mbps-ot biztosít, de csak álló helyzetben, mozgás közben 384 – 1000 kbps az érték. A 3G hálózatokat kivezetik az 5G elterjedésével. A 3.5G elnevezés már igazi szélessávra utal. A HSDPA letöltési sebesség itt felhasználónként elérheti a 14 Mbps-ot, a HSUPA feltöltési sebesség pedig az 5,76 Mbps-t. A 4G-vel és utódaival külön foglalkozunk lejjebb.

- A CDMA (Code Division Multiple Access) hatékonyan használja ki a frekvenciaspektrumot, jó a zavarvédeltsége. A mobil szolgáltatók az 1900 és 2100 MHz-es sávban használják. Lehetőség van ezt használni a korábban 06-60-as számú, 450 MHz-es sávban is, itt jobb a hullámterjedés és kis számú, nagy hatótávolságú antennákkal lehet lefedni a területet. A CDMA adat- és hangátvitelre is alkalmas, de csak korlátozott felhasználó veheti igénybe egyszerre, a ritkán lakott területeken lehet hiánypótló megoldás. Ha nő a felhasználók száma, új bázisállomások beiktatásával, a cellaméret csökkentésével lehet kiszolgálni.
- Az FWA (Fixed Wireless Access) helyhez kötött, de vezeték nélküli hozzáférést jelent, ahol egy központ vevő lát el több állomást (pont – multipont rendszer). Irányérzékeny antennák kellenek. Lakott területeket érdemes besugározni vele. Kiemelt jelentőségű az LMDS és a WiMAX.
 - Az LMDS (Local Multipoint Distribution System) rendszert eredetileg digitális tévére akarták használni, nálunk 26 GHz-en üzemel, kétirányban. A nagy frekvencia miatt közvetlen rálátás szükséges (az antennáknak látniuk kell egymást). Multimédiás hálózatnak megfelelő, DSL vagy DOCSIS rendszerek kiterjesztéseként alkalmazható.
 - A WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) is pont-multipont hálózat. Állandó helyi hozzáférésű rendszer a 2 – 11 GHz sávban, jelenleg 3,5 GHz-en a legelterjedtebb. Legfeljebb 30-60 km-t lehet áthidalni, maximálisan 70 Mbps-al, 20 MHz sáv szélesség mellett. Közvetlen rálátás nem szükséges, az általános lefedettségekhez 4 – 10 km-es hatótávot érdemes tervezni.
- A műholdas hozzáférések lehetnek LEO (Low Earth Orbit), MEO (Medium Earth Orbit), EEO (Elliptic Earth Orbit) vagy GEO (geostacioner) alapúak. A leggyakrabban műsorszóró műholdak egyirányú kommunikációja valósul meg, de internet is lehetséges, ha egy modemen keresztül elküldjük az információt a feladó állomásra. A kétirányú kommunikációhoz VSAT a legjobb megoldás. Ezek általában geostacioner holddal kommunikálnak

TCP/IP-vel. Lehetőség van VLAN rendszerek kialakítására is. Hátránya a késleltetési idő (telefonálásnál számíthat), és a végberendezések ill. a havi díjak magas ára.

- A WLAN elektromágneses hullámokat használ a LAN létrehozására (Wi-Fi). Korlátozott a hatótávolság, ezért helyi kapcsolatok kiterjesztésének a legjobb (lakáson belül, reptéren, szállodákban). Leggyakrabban 2,4 GHz-en működnek, max. 11 Mbps-os sebesség mellett, 100 méteren belül. A felhasználók száma gyakran változik, nehezen méretezhető a rendszer. Ennek alternatívája lehet majd a lokális 5G hálózat.

A nulladik generációs (0G), legelső mobiltelefon- vagy inkább rádiótelefon-szolgáltatás közvetlenül a második világháború után vált elérhetővé. A „nulladik generációs” elnevezés arra utal, hogy a modern mobiltelefon-technológiát ezek a mobilrádiótelefon-rendszerek előzték meg. A 0G-rendszerekben használt technológiák közé tartoztak a PTT (Push to Talk), az MTS (mobiltelefon-rendszer), az IMTS (továbbfejlesztett mobiltelefon-szolgáltatás), az AMTS (fejlett mobiltelefon-rendszer), a norvég OLT (norvégul az Offentlig Landmobil Telefoni, a nyilvános szárazföldi mobiltelefon) és a svéd MTD. Ezek a korai mobiltelefon-rendszerek már kaphatók voltak kereskedelmi forgalomban, és a nyilvános kapcsolt telefonhálózat részét képezték, szemben a zárt rendőrségi rádióval vagy taxidiszpécser-rendszerrel. Leginkább személygépkocsikba vagy teherautókba szerelték, bár táskamodellek is készültek. Az elsődleges felhasználók favágók, ingatlanügynökök és hírességek voltak.

Az első generációt (1G) 1979-ben vezették be, a letöltési sebessége 2 kbps volt, és a 450 MHz-es frekvenciasávot használták. Az első generációba tartoznak a celluláris alapú mobilrádiós-rendszerek azon típusai, melyek úgy tették lehetővé a cellaváltást beszélgetés közben, hogy a hívás emiatt ne szakadjon meg. (A nulladik generációnál még nem volt lehetőség a megszakítás nélküli cellaváltásra.) Nem volt biztonságos, mivel a rádiótornyokon átjátszott hanghívásokat könnyű volt lehallgatni. Érdekes, hogy az 1G-készülékekről érkező hívás minősége általában gyengébb volt, mint a 2G-s eszközöké, az analóg jel mégis nagyobb távolságot tudott teljesíteni. Ennek oka, hogy az analóg jel sima görbével rendelkezik, míg a digitális jel szögletessel. Míg a körülmények romlásával az 1G-s készülékről indított hívás hangminősége fokozatosan romlott a beszélgetés során, a 2G-s telefonról érkező hívás teljesen megghiúsult. Magyarországon a Westel Rádiótelefon Kft. mutatta be az 1G-s technológiát 1991-ben.

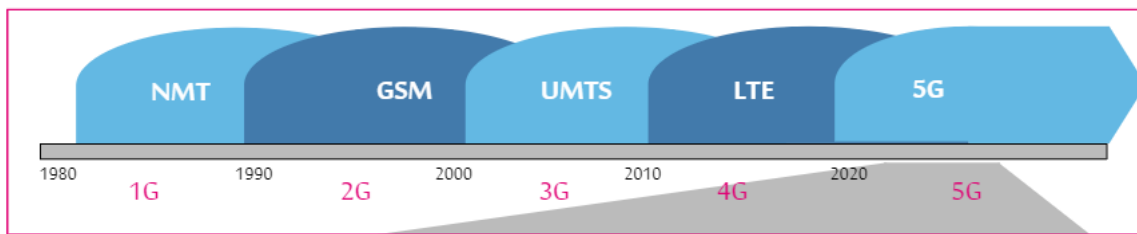
A második generációs (2G) cellás távközlési hálózatokat 1991-ben a Radiolinja, egy finn GSM-szolgáltató hozta kereskedelmi forgalomba. Ez volt az első digitális technológia. A letöltési sebessége 100 kbps. A SIM- (Subscriber Identity Module) kártya is a GSM hozadéka. A 900 MHz és 1800 MHz frekvenciákat használta. A GSM-szolgáltatást ma több mint kétmilliárd ember használja több mint 212 országban. A 2G előnyeként megemlítendő, hogy a digitális jelek kevésbé merítik az akkumulátort. Jobb volt a beszélgetés hangminősége, mivel a digitális kódolás javítja a hang tisztaságát és csökkenti a vonal zaját. A digitális adatszolgáltatás használata segíti a mobilhálózat-üzemeltetőket abban, hogy rövid üzenetszolgáltatást vezessenek be a mobiltelefonokon keresztül. Emellett a digitális titkosítás titoktartást és biztonságot nyújt az adat- és hanghívások számára. A 2G-nél említendő meg a 2.5 G szabvány, vagyis a GPRS (General Packet Radio Service), ami lehetővé tette a multimédiás tartalmak küldését. A Westel 2002. április 18-án indította útjára Magyarországon az MMS- (multimédia üzenet) szolgáltatást, a világon elsőként.

Az első kereskedelmi forgalom előtti 3G-hálózatot Japán indította útjára, a felhasználókhöz 2003-ban jutott el a hongkongi Hutchison Telecommunications révén. A letöltési sebesség már 8 Mbps, és a 2 GHz-es frekvenciát használja. A 3G-technológiákkal a hálózatüzemeltetők fejlettebb szolgáltatásokat kínálhattak nagyobb hálózati kapacitás mellett. A szolgáltatások magukban foglalják már a videóhívásokat és a széles sávú vezeték nélküli adatok továbbítását.

A további szolgáltatások közé tartoznak a HSPA adatátviteli képességek, amelyek kibővítik és javítják a meglévő UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) teljesítményét.

10.2 LTE

A 4G fejlesztésének hátere a nagy adatátviteli sebesség, egy átfogó internet-infrastruktúra, nagy kapacitás és a nyílt internetes szabványok használatára irányuló igény volt. 2009-ben, Oslóban és Stockholmban a világon elsőként indított el nyilvános LTE- (Long Term Evolution) szolgáltatást a TeliaSonera, amivel már HD multimédiás tartalmak megosztását is lehetővé tette a hálózaton keresztül. A letöltési sebesség mobilkörnyezetben 100 Mbps, és 1800 MHz-es frekvenciát használ. LTE-szolgáltatás elsőként 2012. január 1-től volt elérhető a T-Mobile-nál. 326 Mbits átvételre is képes 4×4 antennával egy 20 MHz széles frekvenciatartományon. Fixen 1 Gbps sebességű, mobil esetén inkább csak max. 100 Mbps. A 3G helyetti 4G 5-10 Mbps-ra képes a telefonokon.



Az egyes vezeték nélküli távközlési szolgáltatások fejlődése

10.3 5G és 6G

Az 5G legfontosabb előnyei:

- az alacsony késleltetés (low latency),
- a nagy adatsebesség (Gbps feletti),
- a megbízhatóság növekedése és a
- skálázhatóság (network slicing).

Hátránya, hogy ezeken a frekvenciákon - bár kisebb méretű antennák is elégségesek, - a kis hatótávolság (jellemzően néhány tíz-száz méter) okán azok száma óriási: a jelenleg használatban lévő 3G és 4G antennák sokszorososa, akár több százezer új antenna(tömb) felszerelését igényli. A network slicing annyit jelent, hogy egy fizikai hálózat több logikai alhálózatra (szeletre) felosztható, így míg az egyik egy nagy prioritású kritikus infrastruktúrát lát el alacsony látenciával, egy másik teljesen más feladat kielégítésére szabható.

Elsődleges felhasználónak az ipar és a közlekedés tűnik, valamint a campus hálózatok kifejlesztésével az egyes nagyvállalatok (ill. kórházak, egyetemek stb.) saját hatáskörben, lokálisan helyezhetnek és üzemeltethetnek 5G hálózatokat.

Az alacsony késleltetés megnyitja az olyan alkalmazások előtt az utat, amely gépek és eszközök között nem csupán információcserét, hanem majdnem valós idejű vezérlés-visszacsatolást is lehetővé tesz. Ez magába foglalhatja a klasszikus kép és hang visszacsatoláson túl a kézvezérlés és érzékelés bevonását is (lásd haptic internet). A távvezérlés ilyen foka rendkívül

alacsony késleltetést igényel. A képi információ 10-15 ms, a hang 3-5 ms, míg a tapintás 1 ms körüli emberi feldolgozási időt igényel. Belátható, hogy ha fénysebességgel terjed az információ, több ezer km-es távolságoknál ezt a jelterjedés meghaladja. Így komoly szerepet kaphatnak azok a virtuális, beágyazott valósággal operáló, ún. digital twin-eket létrehozó megoldások, ahol a robot teljes értékű digitális másolata rendelkezésre áll a betanításhoz.

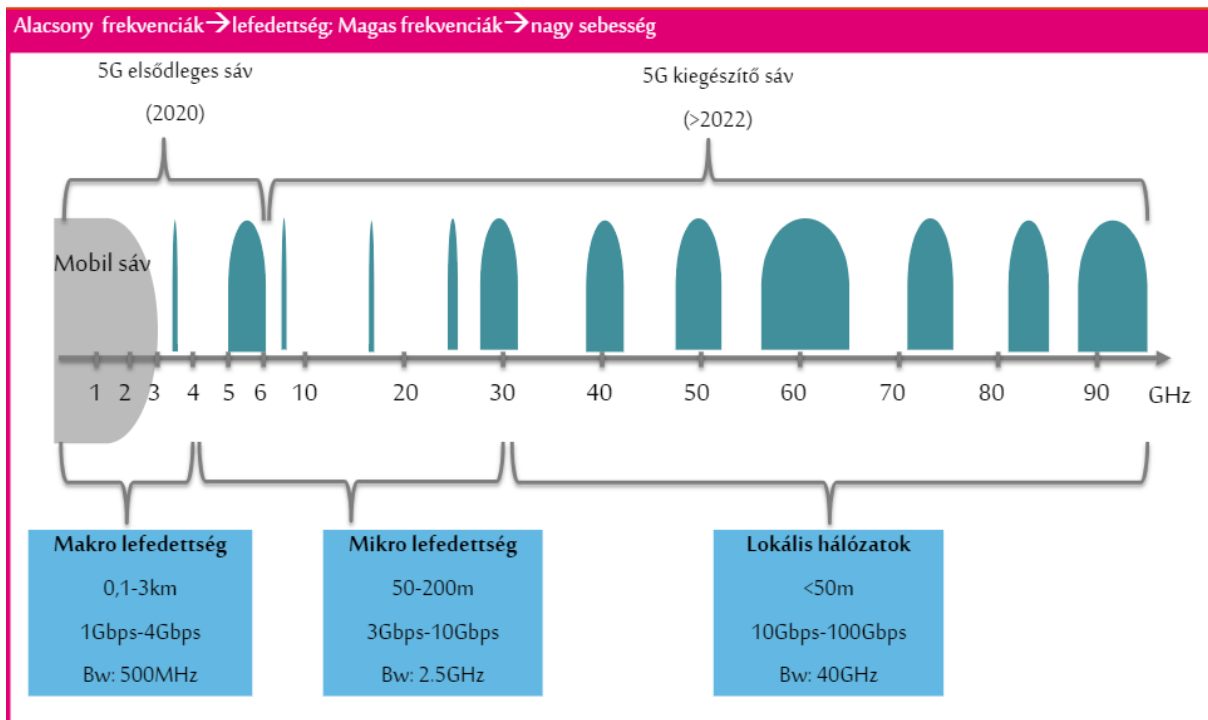
Az 5G ígérete sebességben kb. 10x gyorsabb, mint a 4G. Késleltetése (látencia) 1ms a 25 ms-al szemben, egy cella pedig akár egymillió eszközt is kezelhet. A működés elvben 500 km/h-nál is garantált a 4G 200 km/h-val szemben. 2020 tavaszán a technológia által elért sebesség 1,7 Gbps körüli 5G-ben, míg 4G-ben 1 Gbps körüli. A minimális látencia 8 ms, de a 4G is tud 15 ms-ot. Egemillió eszköz megjelenése egyelőre nem várható egy cellában, az utazási sebesség is kielégítő 200 km/h-ig.

A terjedés ütemére jellemző, hogy az első bázisállomások és az igazi használat között jellemzően 2-3 év telik el. Jelenleg nem egyértelmű, mire lesz az 5G nyújtotta sebesség és alacsony késleltetés használható. A 4G esetén is ez volt a helyzet: előzetes ötletek egy része nem vált be, míg mások a használat során jöttek elő. Várható a fix wireless access fontossága, ahol az otthoni net utolsó lépése már nem vezetékes lesz, hanem 5G. Egy stadionban pl., ahol most wifi szolgálja ki (meglehetősen lassan) a nézőket, az 5G komoly alternatíva, mert jobb lesz.



Felhasználó-vezérelt bevezetés lesz. Amíg a 4G-hez új SIM kártya kellett, az 5G-hez nem fog, elég "csak" új telefon. A 3G és a 4G bevezetésekor, amely a mobil netezést célozta, még magyarázni kellett a reklámokban ennek értelmét. Az 5G-nél már nem kell a mobilnet fontosságát és szerepét hangsúlyozni, és az alkalmazás-orientált reklámokra készülhetünk. Ha

a felhasználó lelkes a technika kipróbálásában (pl. oktatás, sportesemények), az segíti a terjedést.



A GHz-es tartomány felhasználható csatornái (5G számára).

Mіндеzek mellett már a 6G kutatások is megindultak. Ez a THz-es tartományban, Tbps sebességet ígér, viszont extrém kis távolságok esetén (néhány cm – néhány méter). Az itt található, ún. „THz gap” olyan frekvenciasávot jelöl, amelyet semmire sem használunk jelenleg, és a terjedési viszonyok sem ismertek. Jellemzően optikai eszközök is bevetésre kerülnek majd, hiszen már nem vagyunk messze a látható fény tartományától. A kommunikáció nem lakossági, hanem speciális igények kielégítést célozza a rövid hatótávolság miatt. Jelenleg az antennák megvalósítása is kérdéses, néhány prototípus létezik csak.

6G hivatalosan nem létezik, még hivatalos logója sincs. Egyes vélemények szerint az 5G csak ugródeszka lesz a még fejlettebb 6G-hez, míg mások óva intik a felhasználókat, hogy ne akarják túl korán átugrani és kihagyni az 5G-lépcsőfokot. Ha már a bevezetés, elterjedés és kiforrott használat előtt kivár a piac, és várakozik arra, amire még az 5G sem képes, ez lassíthatja és akadályozhatja a fejlesztéseket. A 6G-nél felmerülő előre látható problémák az 5G esetén is jelen vannak, azok megoldása a jelenlegi fejlettségi szinten elkerülhetetlen.

A THz-tartomány teljesen más eszközöket és technológiát igényel, mint az alatta található mikrohullámú és a felette található optikai hírközlés világa. Míg előbbiben az elektronikai készülékek, utóbbiban a fotonikai eszközök rendelkeznek kiforrott technikával. A terjedés sajátosságait is meg kell vizsgálni (levegő és vízgőz elnyelése, abszorpció, szóródás, irányítottság stb.). A hírközlés számára tervezett 0.1-10 THz tartományban kevés eszköz létezik, a kutatások jelenleg is folynak. Az alkalmazott berendezések nem lesznek tisztán optikai alapúak, hanem opto-elektronikus hibridek (alapsávi nagysebességű félvezető alapú elektronika és egy front-end, ami vivőhullámra ülteti a jelet). Klasszikus erősítő vagy oszcillátor nehezen valósítható meg. E hibrid eszközök fejlődése elsősorban a detektorok és jelforrások területén várható, ahol félvezetőlézer-alapú helyi oszcillátor és fotodiódák kapnak szerepet.

A kis hullámhossz miatt az alkalmazott antennaméret is a mm – néhány száz mikrométer nagyságban (tömbökbe rendezve) képzelhető el. Problémaként jelentkezik, hogy a rövid, néhány méter-tíz méteres hatótávolság miatt nagy mennyiségű antenna szükségeltetik, és

emellé nagy energiaigény is társulhat. A hatótávolság általános szabály szerint csökken, a nyalábformázhatóság (beamforming) pedig szűkebbre vehető a frekvencia növelésével, ez azonban optikai kommunikáció esetén nem ilyen egyértelmű. Az első szabványosítási lépéseket 2030 körül várják.

2020 novemberében Kína fellőtt egy 13 műholdból álló családot, amelyben található „6G műhold” is, amely a terahertzes űrbéli kommunikációt hivatott tesztelni. 2021 elején a kínai Oppo cég elérte a 206 Gbps sebességet, valamint kiadta az első ún. „fehér könyvet” a 6G fejlesztésekről. 2022 elején sikerült a pekingi egyetemen egy másodperc alatt 1 TB adatot átvinni 1 km-es távolságra, amely megnyithatja az utat a szuperszónikus fegyverekkel való kommunikációra. A kereskedelmi (nem katonai) alkalmazásokat 2030-ra várják. Jelenleg a 6G-hez köthető szabványok 40%-val Kína, 35%-val az USA rendelkezik.

2022 szeptemberében az LG sikeresen tesztelte a 6G adatátvitelt a 155-175 GHz-es frekvenciatartományban, 320 méteres távolságban, szabadterén. A kísérlet érdekessége az az erősítő, ami ezen a frekvencián kis zajjal működik, és javítja az adást és a vételt. Az LG azt tervezi, hogy szeptember 23-án a szöuli LG Science Parkban rendezendő 6G Grand Summiton jelenti be a legújabb 6G-s fejlesztéseit.



Az LG 6G-s rendszere a berlini tesztek során.

10.4 Hazai helyzet

Hazánkban hét vizsgált sávból a piaci érdeklődés és szakmai egyeztetések eredményeképpen négy frekvenciasávban indított értékesítési eljárást 2019-ben a hírközlési hatóság, míg az 1500 MHz-es, a 2300-2400 MHz és 26 GHz-es frekvenciasávokban egyelőre nem. A nyertesek tizenöt évre kapják meg a használati jogosultságot, ami egyszeri alkalommal további öt évre meghosszabbítható. Az árverésen összességében megszerezhető értékesítési egységek az alábbiak voltak:

- a 700 MHz-es frekvenciasávban kétszer 25 MHz (párosítva használható);
- a 2100 MHz-es frekvenciasávban kétszer 15 MHz (párosítva használható);
- a 2600 MHz-es frekvenciasávban 15 MHz;
- a 3600 MHz-es frekvenciasávban 310 MHz.

Az NMHH célja, hogy egyrészt a szolgáltatók a spektrumrészek értékesítésével legkésőbb 2020 végéig rendelkezhessenek az 5G hálózatok működéséhez szükséges frekvenciával, másrészt,

hogy az új frekvenciák felhasználásával növelhessék a már üzemelő mobilhálózatok kapacitását. A 700 MHz-es frekvenciasáv a földfelszíni digitális televíziós műsorszórásból kerül át a széles sávú mobilfelhasználás céljaira, különösen az 5G bevezetése érdekében. A Telekom, a Telenor és a Vodafone vett részt rajta. 2020. március 26-án sikeresen lezajlott a frekvenciaárverés Magyarországon. Ezen a három nagy szolgáltató összesen 128 és fél milliárd forintért szerzett frekvenciasávokat.

Az NMHH a frekvencia-tender tavaly nyáron történt meghirdetésekor előnyben kívánta részesíteni, díjkedvezményt kívánt adni azoknak a szolgáltatóknak, akik felsőoktatási intézmények területén hajtanak végre 5G-s fejlesztéseket. Ezzel az NMHH elő kívánja segíteni, hogy az egyetemek az 5G-s hálózati hozzáférések, műszaki fejlesztések és új szolgáltatások kialakításának "motorjai" lehessenek. Egyetemünk sok-sok területen érintett az 5G technológiák felfuttatásában, ezért jövőnkét illetően kulcsfontosságú ezen lehetőségek maximális kihasználása.

2020 októberében a Vodafone bejelentette, hogy Budapesten megnyitják az 5G szolgáltatást majdnem teljes lefedettséggel.