

7. fejezet – A fizikai réteg

A fizikai réteg

A számítógép hálózatok fizikai rétege jellemzően az általunk tárgyalt hivatkozási modellek legalsó rétege, és mint ilyen a fizikai összeköttetés biztosítása a feladata. Feladata, hogy a kommunikációban részt vevő jeleket eljuttassa az adótól a vevőig, a felhasználható közegeken keresztül. A jelek az átvitel folyamán lehetnek analóg vagy digitális jelek, az egyetlen szempont az, hogy az adó oldali egyes illetve nulla a vevő oldalon is egyes illetve nulla legyen. Tehát a jelek feldolgozása, értelmezése mindenképpen digitális formában történik. A közeg többféle lehet, azaz az átvitel történhet elektromos kábelben, optikai kábelben, lézerrel, rádióhullámmal, stb.

Fontos megjegyezni, hogy a legelterjedtebb számítógépes hálózatok, az Ethernet hálózatok nem a "Számítógépek Architektúrája" című tantárgyban megismert klasszikus TTL vagy CMOS feszültségszintekkel dolgozik, hanem jellemzően +2.5V és -2.5V közötti szintekkel. (Így el lehet kerülni a 0V nulla bitként való értelmezését, és a kábelszakadás nem lesz 0-ás bitsorozat. Két egyidejű 0V-os nulla bit ütközésének észlelése is lehetetlen.)

Egy kis kitérő a soros kommunikáció irányába (pont-pont kommunikáció)

Számítógépeink egymással, illetve bizonyos perifériákkal (pl. nyomtatók) nem csak klasszikus értelemben vett számítógép hálózat segítségével képesek kommunikálni. Az asztali számítógépek illetve a notebook-ok jellemző kommunikációs csatlakozói még az USB (Universal Serial Bus / Univerzális Soros Busz) 1.1, 2.0 és/vagy 3.0 szabvány szerinti, illetve a „klasszikus” soros port (RS-232: Recommended Standard / Javasolt Szabvány), [illetve a FireWire, vagy a párhuzamos port, melyekről most nem lesz szó].

A kommunikáció szempontjából kétféle kapcsolati módot különböztetünk meg, az UART és az USART módot. (Universal *Synchronous* Asynchronous Receiver Transmitter / Univerzális *Szinkron* Aszinkron Vevő Adó [Adóvevő]). A szinkronizáció megvalósítása jellemzően bonyolultabb, mint amekkora az átvitel plusz hozadéka, ezért a könnyebben megvalósított UART az elterjedtebb megoldás.

A soros aszinkron adatátvitel lényegében különbözik más digitális adatátviteli módoktól, mert a kommunikáció nem tartalmazza az adatforgalom szinkronizálását végző közös „clock” órajelet. Nincs egy vezeték, ami az adást és a vételt összehangolja, ezért egy előre meghatározott frekvenciával kell mind az adatokat küldő készüléknek az adatot küldeni, mind a vevő készüléknek a bejövő adatból meghatározott időközönként mintát venni. Mielőtt 2 eszköz kommunikálni tudna egymással, a közöttük történő információcsere alapvető szabályait tisztázni kell.

	TTL	RS-232	USB
Alkalmazási réteg	10 bites adatcsomagok: Start+Adat+Stop	10 bites adatcsomagok: Start+Adat+Stop	<i>ebbe nem mélyedünk el...</i>
Adat réteg	pl. 9600 8N1 esetén: 9600 bps, 8 adatbit, 1 Start és 1 Stop bit, paritás nélkül	pl. 9600 8N1 esetén: 9600 bps, 8 adatbit, 1 Start és 1 Stop bit, paritás nélkül	<i>ebbe nem mélyedünk el...</i>
Logikai réteg	Logikai 1: +5V Logikai 0: 0V	Logikai 1: -12V Logikai 0: +12V	Logikai 1: DATA+ > +2.8V és DATA- < +0,3V Logikai 0: DATA+ < +0,3V és DATA- > +2,8V
Elektromos réteg	+5V illetve 0V	+5-től +25V-ig illetve -5V-től -25V-ig	+5V illetve 0V
Fizikai réteg	3 vezeték (Rx, Tx, GND)	9 vezeték, de csak 3 aktív (Rx, Tx, GND)	4 vezeték (DATA+, DATA-, +5V, GND)

A táblázatban, az adat rétegben szereplő paritás, a hibajelzést segíti – amennyiben használatban van. Az „N” pont az jelenti, hogy nincs külön paritásbit. Amennyiben van, akkor az alkalmazás rétegben szereplő 10 bites csomagot 11 bitesre bővíti. A paritásbit az ilyen módon kódolandó kódszó tartalma alapján generálódik, a kódszóban található 1-es bitek alapján. Az egyetlen szempont nem az 1-es bitek száma, hanem, hogy páros vagy páratlan darab van-e az adott kódszóban. Ebből logikusan következik, hogy megkülönböztetjük a páros vagy a páratlan paritás generálást. Páros paritás generálás esetén a paritásbit értéke 0, ha a kódszóban lévő 1-es bitek száma páros, és 1, ha ez a szám páratlan. Páratlan paritás generálás esetén a paritásbit akkor 0, ha a kódszóban lévő 1-es bitek száma páratlan, és 1, ha a számuk páros. Az előző két mondat első olvasatra logikátlannak tűnhet. A követendő logika ez esetben az, hogy az elnevezés a paritásbit generálása utáni állapotra utal. Miután a kódszóhoz hozzáadtuk a paritásbitet, az így előállított bitsorozatban található egyesek számára vonatkozik az elnevezés.

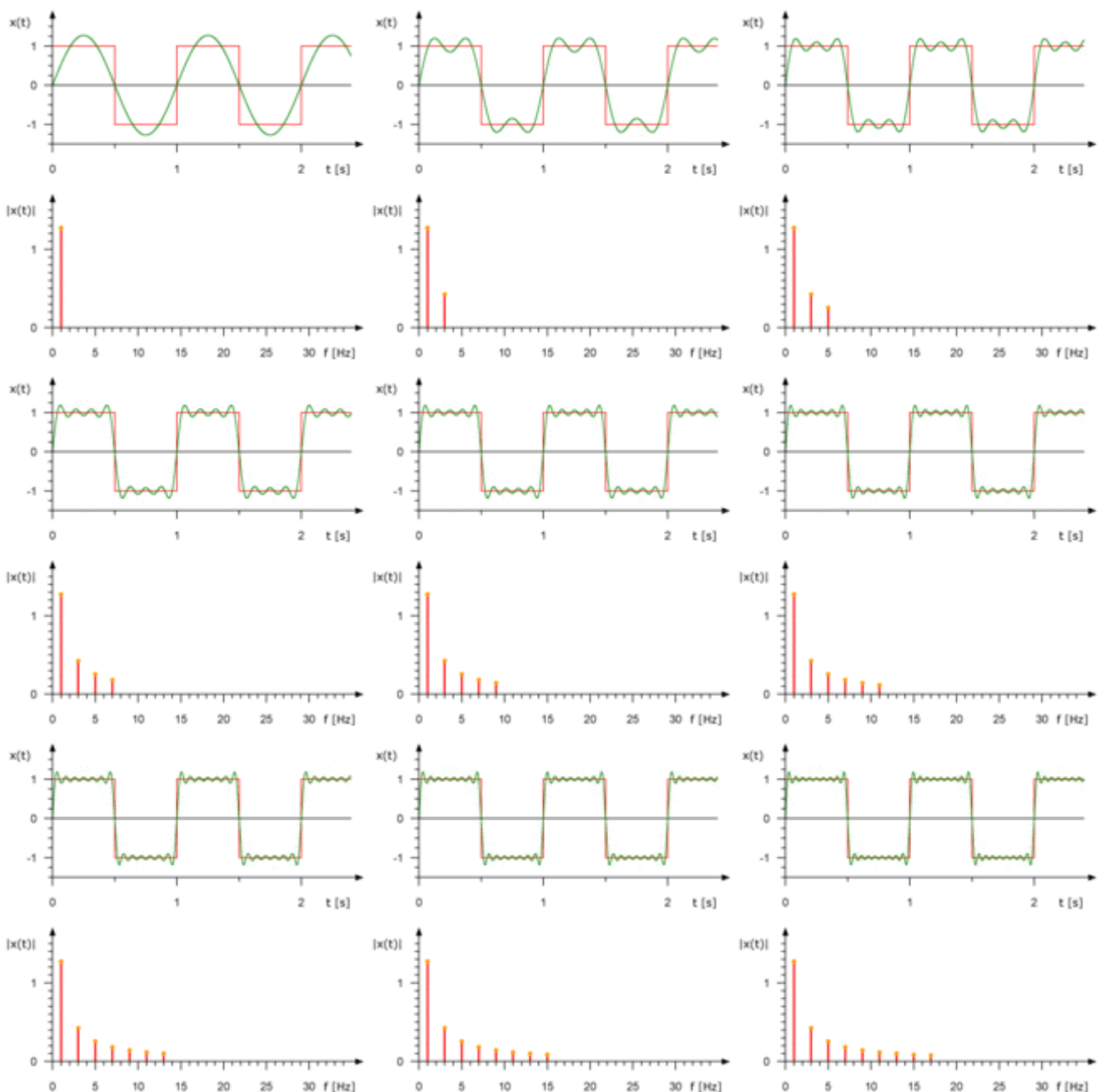
A klasszikus CRC (Cyclic Redundancy Check / Ciklikus Redundancia Ellenőrzés) ellenőrzés a páros paritás generálás elvének megfelelően történik. (A paritásellenőrző módszereknek vannak korlátai, hiszen egy paritásbit csak egyetlen egybites hiba felismerését garantálhatja. Ha két vagy több bit sérül, akkor az ellenőrzés helyes eredményt adhat, annak ellenére, hogy az átvitel hibás volt.)

A táblázatban a CMOS nem szerepel, mivel ebben az esetben pont a CMOS egyik előnye, a tetszőleges 3V és 18V közötti tápfeszültség, és az 1/3, 2/3 feszültséghez tartozó logikai szintek hátránnyá válnak. Nem lehetünk biztosak abban, hogy a kapcsolat mindkét oldalán – a mára már *de facto* elektronikai I/O szabvány szerinti – 3,3V-os tápfeszültségű CMOS rendszer üzemel.

Ahhoz, hogy egyszerre több, különböző érdemi információt tudjunk vezetéken keresztül továbbítani – vagyis, hogy ne csak ki- és bekapcsolni tudjunk valamit a vezeték másik oldalán – az átfolyó áram erőssége, a kapocsfeszültség, illetve a frekvencia áll rendelkezésünkre, mint módosítható, változtatható fizikai paraméter. A feszültség illetve az áramerősség változását egy egyváltozós időfüggvénnyel $f(t)$ képesek vagyunk leírni. A függvénnyel, mint modellel már lehetőségünk nyílik matematikai módszerekkel történő elemzésre.

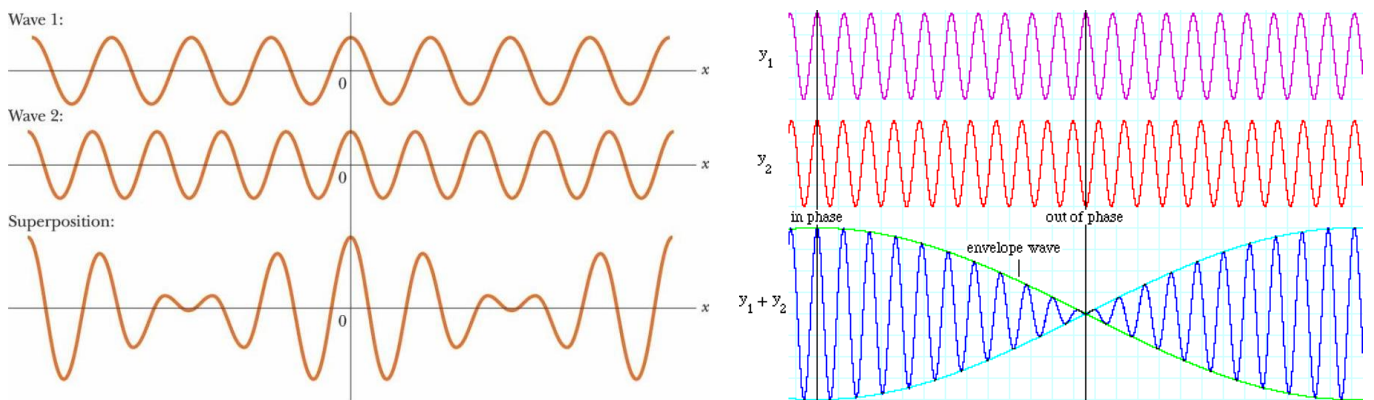
Összetett jelalakok – mint például a négyzetjel – egyszerű superponálással előállítható például egy szinusz jelből, és annak felharmonikusaiból, tetszőleges pontossággal.

[szuperpozíció: A független fizikai mennyiségek vektoriális összegződésének elve.]



A legkisebb frekvenciájú összetevőt alapharmonikusnak, a többszörös frekvenciájú összetevőket felharmonikusnak hívjuk. A tisztán szinuszos váltakozó áram egy speciális eset, amikor a felharmonikusok amplitúdója és az egyenáramú összetevő egyaránt nulla.

Az előző ábrásor felső részeiben piros színnel van jelölve az a négyzetjel, amit az ábrásor alsó részeiben jelölt amplitúdójú alapharmonikkal valamint ábráról-ábrára egyre több felharmonikkal próbálunk meg előállítani. A zöld jel a szuperponálás eredménye.



A fenti két ábra két hullám szuperponálást mutatja. A két összeadandó hullám frekvenciája mindkét esetben kissé eltér. A két összeadandó hullám fázisa a bal oldali ábrán azonos, a jobb oldali ábrán ellentétes.

A digitális jelfeldolgozás szempontjából a négyzetjel az ideális alak. Ez az ideális jelalak azonban nem feltétlenül továbbítható (nagy távolságba) torzításmentesen. Egy önálló jel, jelsorozat alakjának torzulása – amit az átvitel közben elszenved – nem minden esetben okoz problémát, amíg a szabványos digitális jelszintek szerint értelmezhető. Összetett, kódolt jelsorozat esetében azonban már kritikusabb a helyzet, hiszen az összetett jel egyes összetevői különböző mértékű és fajtájú csillapításokat, torzulásokat szenvedhetnek.

A Fourier-analízis (történeti áttekintéssel)

A tudomány, különös tekintettel a matematika és a fizika világára, mindig fogékony volt a gyakorlati problémákra. A felmerülő kérdésekre, problémákra a matematikai válaszokat a megfelelő operandusok, műveletek segítségével lehetett megadni. Az új feladatok megoldása új operandusokat igényelt. Így természetes, hogy a differenciálszámítás és az integrálszámítás – mint operandusok felismerése – is az adott kor, a XVII-XVIII. század kérdéseire, problémáira kereste a választ. Hosszú út vezetett a rezgő húr egyenletétől, a rezgő sík (pl. egy pergődob) egyenletén át a térbeli rezgések matematikai leírásához.

Jean Baptiste Joseph Fourier (francia matematikus és fizikus, 1768 – 1830) fő kutatási területe (és egyben kedvenc időtöltése) a hőtan, azon belül is a hőáramlás volt. Röviden összefoglalva azt vette észre, hogy egy homogén rúdban a hőmérséklet változása, eloszlása a rezgő húr állapotaihoz hasonlóan alakul, azaz semmi esetre sem egyszerűen egyenesen arányos a távolsággal. A hő a rúd végpontjaiban hasonlóan verődik vissza, mint a húr rezgése a rögzített végpontokból. A sok visszaverődés pedig szuperponálódik.

„A klasszikus harmonikus analízis, a Fourier-analízis gyökerei mélyre nyúlnak. Mondhatnám, Isten volt az első, aki Fourier-analízist művelt, amikor fülünkbe beépített egy Fourier-analizátort. Ugyanis már a gyermek is képes arra, hogy különbséget tegyen például a hegedű és a harsona hangja között. Annak ellenére, hogy a hangjegyek, amelyekkel a dallamot leírjuk, ugyanazok. Mi akkor a különbség a két hang között? Az, hogy amikor megszólaltatunk egy hangot, az sosem csupán tiszta hang, hanem több felhangból álló együttes. Kissé általánosabban fogalmazva: minden függvényben, ami egy hangzásnak megfelel, sok rejtett információ van, amit észlelni kell, s fülünk észlelni is tudja.” [W. R. Wade, matematika professzor, University of Tennessee, Knoxville, USA]

Mai értelemben, a távközléstechnikában a Fourier-analízist úgy tekintjük, mint azt az operandust, ami lehetővé teszi számunkra, hogy szinuszos és koszinuszos összetevőkből tetszőleges jelalakot (legtöbbször négyszögjelet) állítsunk elő, tetszőleges pontossággal. A T periódusidejű, periodikus $g(t)$ függvény előállítására a szinuszos és koszinuszos jelek szummázásával:

$$g(t) = \frac{1}{2}c + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(2\pi nft) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(2\pi nft)$$

A képletben az $f = 1/T$ az alaphfrekvencia, az a_n és b_n pedig az n -edik harmonikus tag (azaz felharmonikus) szinuszos illetve koszinuszos amplitúdója. Fontos megjegyezni, hogy a fenti összefüggés feltételezi, hogy a teljes jelalak folyamatosan ismétlődik.

Ahhoz, hogy az a_n és b_n valamint c értékét megkaphassuk, azaz, hogy megtudjuk, hogy a kívánt jelalak előállításához az egyes felharmonikusokból mekkora amplitúdóra van szükség, a fenti képletből kiindulva eljuthatunk a következő három egyenletet kapjuk.

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \sin(2\pi nft) dt \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \cos(2\pi nft) dt \quad c = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) dt$$

Nem szabad elfeledkezni arról, (a Fourier-analízis ismeretében) hogy hiába küldök be a csatornába egy digitális jelet, az kvázi analóg jelek kombinációjaként fog a csatornán áthaladni. A kombinációban részt vevő analóg jelek pedig a csatorna és saját fizikai paramétereik szerint különböző módon csillapodnak és torzulnak.

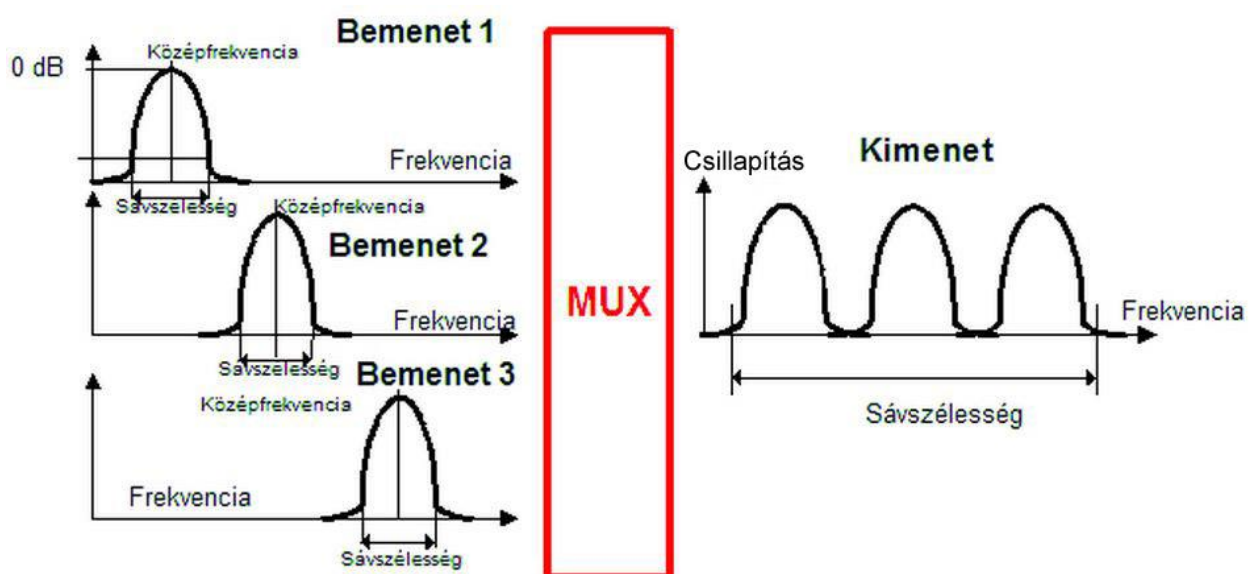
A jelek, jelsorozatok torzulása akkor kezd komoly problémákat okozni, amikor egy időben és azonos fizikai csatornán kívánunk egyre több jelet, jelsorozatot átvinni (például moduláció segítségével), ugyanis ez esetben az információt hordozó jel és az információs tartalom közvetlenül már nem vezethető össze.

A gyakorlatban, emiatt, mert az összetett jel egyes összetevői különböző mértékű és fajtájú torzulásokat szenvedhetnek csak sávkorlátozott jeleket alkalmazunk. Egy jól megválasztott korlátozott sávon belül a csillapítások és torzulások még az elviselhető tartományon belül maradnak. Ezt a frekvenciatartományt nevezzük sávszélességnek (Bandwidth).

Az átviteli spektrum kihasználása

Az alapsávi átvitelen túlmutató technológiára van szükség akkor, amikor egy fizikai átviteli csatornába, például kábelbe egyszerre és egy időben több, egymástól független jelet kívánunk átvinni. A jelek egymástól jellegükben (analóg, digitális), kódolásukban és tartalmukban is eltérhetnek, mégis megvan a megoldás arra, hogy egy közegben utazzanak.

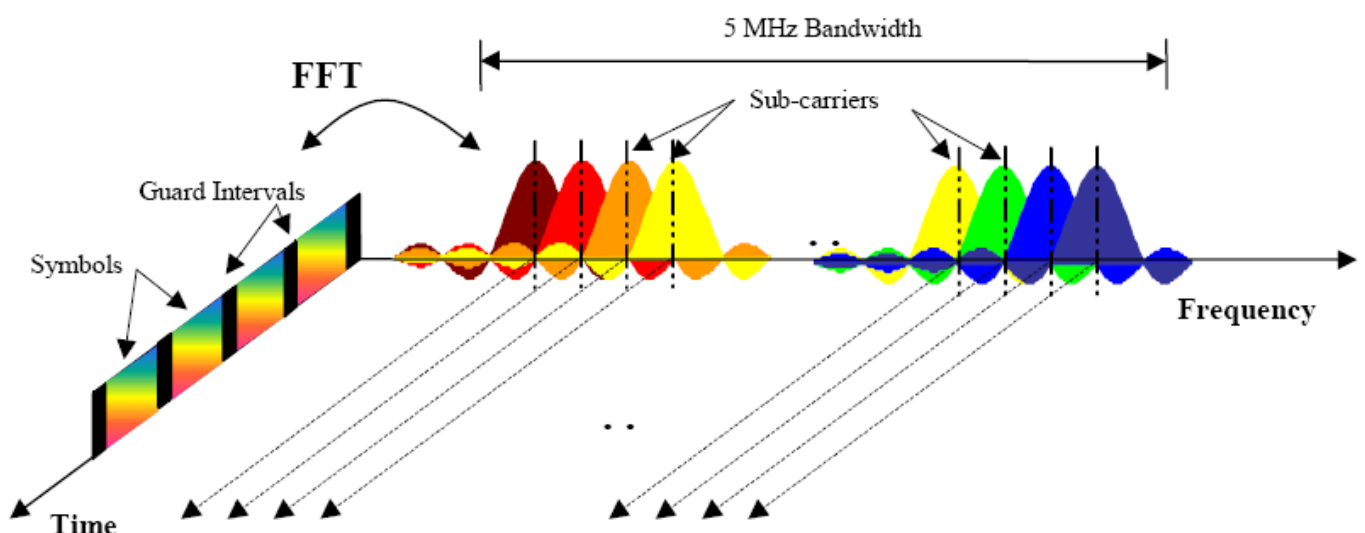
A megoldás a különböző jelek „egymás utáni felpakolása” az átviteli spektrumban. Ezt az eljárást hívjuk FDM-nek [vagy MUX-nak] (Frequency Divison Multiplexing / Frekvenciaosztásos Multiplexelés), amely főleg az analóg technológiában használatos.



Például a klasszikus analóg telefon 300Hz és 3.400Hz közötti tartományban dolgozik. A hagyományos analóg TV adás (ami éppen 2013-ban szűnt meg Magyarországon) minden egyes csatornája pedig 6,5MHz (az OIRT; illetve 5,5 MHz a CCIRT szabvány szerint) széles sávot foglalt el. Az, hogy egy arra a célra szánt vezetéken mennyi telefonbeszélgetés, illetve mennyi TV csatorna vihető át egyszerre attól függ, hogy mekkora a vezeték átteresztő képessége.

(Példa kedvéért: Ha egy – ősrégi – analóg telefonközpontokat összekötő telefonvezetéken 150kHz a sáv szélessége, akkor ebbe a sávba megfelelő eljárással – például 4kHz-enként bepakolhatunk egymás után $150/4=37.5$, azaz 37 darab fent említett hangcsatornát. Azaz egy szem kábelen (érpáron) akár 37 egyidejű beszélgetés is megvalósítható.

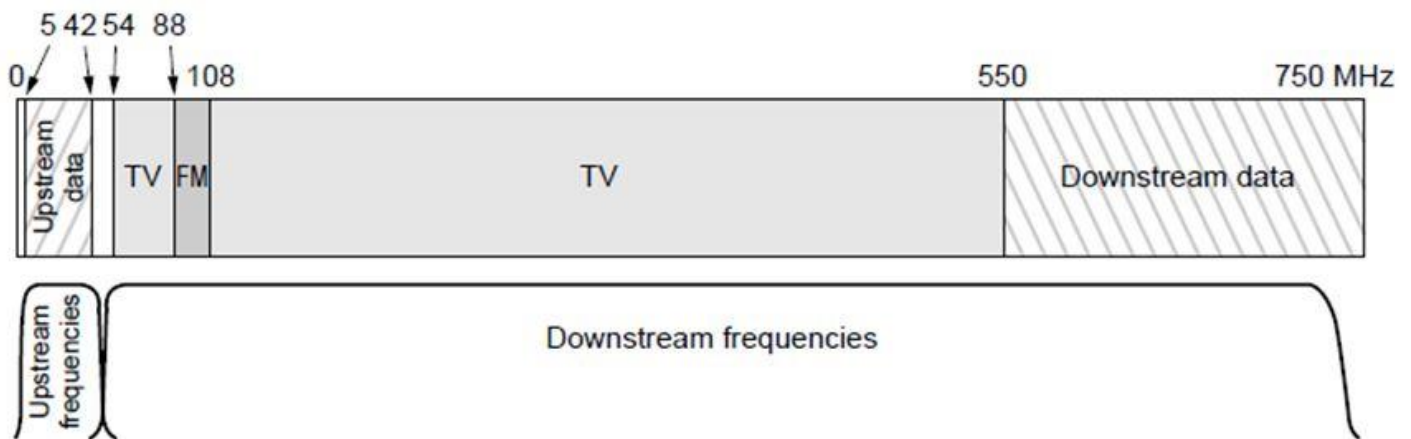
Tisztán digitális jelek esetében a spektrum még hatékonyabban is kihasználható, hiszen ez esetben az FDM-ben alkalmazott védősávokra sincs szükség. Az OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing / Ortogonális Frekvenciaosztásos Multiplexelés) az egyik legelterjedtebb megoldás a hatékonyság növelésére. Ez esetben a felhasznált sáv szélesség több alvivőre (Subcarrier) van felosztva, amelyek egymástól függetlenül kommunikálnak. Az egyes csatornák részben át is fedik egymást, olyan szorosan helyezkednek el egymás mellett a rendelkezésre álló spektrumban. Gyakorlatilag két csatornányi helyen három csatorna zsúfolódik össze. Az egyes alvivőkből származó jeleknek a szomszédos tartományokba való átérése mégsem zavaró, hiszen a mintavétel az egyes alvivők középfrekvenciáin történik, ahol a szomszédos csatornák amplitúdója nulla. Az OFDM használatos vezetékes és vezeték nélküli (LTE, IEEE802.11 a/g/n) átvitel esetében is.



[Az Ortogonális szó elsődleges jelentése: merőleges. Ez esetben azonban azt fejezi ki, hogy: egymástól független.]

[Az FFT jelentése Fast Fourier Transformation / Gyors Fourier Transzformáció. Az FFT nagyszámú mintavételezést igényel.]

Vezetékes átvitel esetén például egy jellemző „Három-az-Egyben”, KábelTV + Internet + Telefon szolgáltatás a következő módon valósítható hatékonyan meg a frekvenciaosztásos multiplexelés segítségével. Az szolgáltatások egy része analóg egy része digitális, ezért természetesen védősávokra is szükség van, de ezeket az ábra nem tartalmazza. Egy kábelTV hálózat jó minőségű koax kábele akár 750MHz átvitelére is képes, azaz megfelelő technológiával jó sok minden [analóg TV, digitális TV, internet] elfér benne szépen egymás után felmodulálva a frekvenciasávban.)



A legfontosabb, amit az ábrán észre kell vennünk az az, hogy a feltöltés (Upstream) a spektrum alján, a letöltés (Downstream) [legyen az TV vagy Internet] pedig a spektrum feltöltés feletti tartományában található. A telefon külön nincs jelezve, de mivel ott feltöltés és letöltés egyaránt van, így az nyilván a spektrum alján kap helyet.

Miért is jó ez? Ebből a műszaki megvalósításból az az előny fakad, hogy a feltöltést – ami a felhasználói oldalon keletkezik – csak egy keskeny sávban kell erősíteni, ráadásul a sáv legalján. A letöltés jellegű adatok viszont a szolgáltató központjából érkeznek, ahol azokat drágább és bonyolultabb berendezésekkel – egy sokkal szélesebb sávban – hatékonyan lehet erősíteni.

A sávszélesség, mint fogalom mást jelent villamosmérnök és mást egy mérnök informatikus számára. A villamosmérnök gondolkodásmódja és megközelítése szerint a sávszélesség egy Hz-ben mérhető mennyiség, míg az mérnök informatikus számára a sávszélesség adatátviteli képességet, azaz egy bit/sec jellegű mennyiséget jelent.

Az előző két megközelítés (azaz a Hz illetve a bit/sec) között számos összefüggés van. A legfontosabb a Henry Nyquist (USA) által 1924-ben felismert összefüggés, ami kimondja, hogy a még egy tökéletesen csillapítás- és torzításmentes csatornának is megvan a maximális átviteli kapacitása. Claude Shannon (USA) 1948-ban ezt azzal egészítette ki, hogy az ideális csatornákon túl a zajos (fehérzaj, rózsazaj, termodinamikus zaj) csatornákra is végzett számításokat.

A csatornán átvitt adatok értelmezése, azaz az adatok visszaállítása Nyquist bizonyítása szerint a következő. Ha egy tetszőleges jelet egy B sávszélességű, aluláteresztő szűrőn bocsájtunk át, akkor a szűrt jelből másodpercenként pontosan $2B$ minta vételezésével a jel visszaállítható. Másodpercenként $2B$ -nél több mintavételre nincs szükség, mivel az aluláteresztő szűrő a magasabb frekvenciájú komponenseket már eleve kiszűrte. Amennyiben a jelnek V diszkrét szintje van, akkor a Nyquist tétel kimondja:

Maximális adatsebesség = $2B \log_2 V$ [bit/sec] [a B mértékegysége Hz]

Zajos (azaz nem ideális, hanem valóságos) csatornák esetében számolnunk kell a jel/zaj viszonytal is (SNR – Signal to Noise Ratio). A jel teljesítményét S , a zaj teljesítményét az N jelöli, így a jel/zaj viszony az S/N hányadosa. A hatalmas értéktartomány miatt a hányadost $10 \log_{10} S/N$ logaritmikus skálán ábrázoljuk. A logaritmikus skála egysége a deciBel [dB], amit a telefon feltalálója, Alexander Graham Bell-ről neveztek el. (A logaritmikus skála miatt, ha $S/N=10$, akkor az 10dB, ha $S/N=100$, akkor az 20dB, $S/N=1.000$, akkor az 30dB.)

Shannon tétele azt mondja ki, hogy egy B sávszélességű, S/N jel-zaj viszonyú csatorna esetében mekkora az elérhető maximális adatsebesség:

Maximális adatsebesség = $B \log_2(1+S/N)$ [bit/sec] [a B mértékegysége Hz, az S/N -é dB]