

## Moduláció

A hátralévőkhben a modulációról, és a különböző modulációs módszerekről lesz szó.

# Tematika

- **Modulációk**
  - Modulációs tétel
  - CW
  - Fónia: AM, FM
  - Analóg képátvitel: SSTV
  - Digitális: FSK, PSK, QAM
  - IQ (de)moduláció

## Modulációs tétel

$$\cos(a) \cdot \cos(b) = \frac{1}{2} \cos(a+b) + \frac{1}{2} \cos(a-b)$$

$$\cos(\omega_1 t) \cdot \cos(\omega_2 t) = \frac{1}{2} \cos[(\omega_1 + \omega_2)t] + \frac{1}{2} \cos[(\omega_1 - \omega_2)t]$$

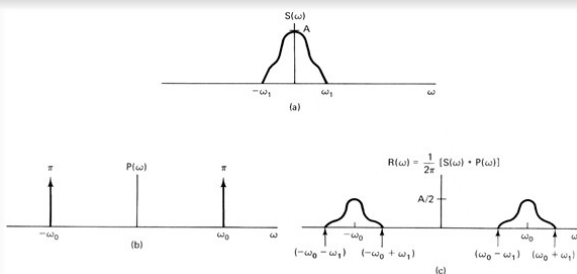
Két jel szorzatában a frekvenciáik különbsége és összege jelenik meg

**Frekvenciatartománybeli eltolás!**

Két szinuszos jel összeszorzásakor két új frekvenciájú jelet kapunk, melyek az eredeti frekvenciák összegén, és különbségén helyezkednek el.

Így az eredeti jelek helyett valami más frekvenciájúakat kapunk, vagyis a jeleinket eltoltuk frekvenciatartományban.

## Modulációs tétel spektrumábrán



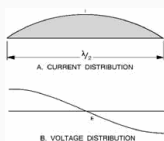
A modulációs tétel szemléltetése frekvencia tartományban:

Az (a) ábrán látható jelet összeszorozzuk a (b) ábrán látható jellel, így a (c) ábrán látható spektrumot kapjuk: Az alapsávi jelünket „odébb toltuk”  $\omega_0$  körfrekvenciával.

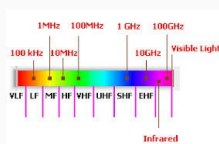
A (b) ábrán látható jel egy szinusz (egy bizonyos frekvencián létezik), viszont az (a) ábrán látható jel több frekvenciát tartalmaz. Ettől nem ijedünk meg, mert a modulációs tételt frekvencia komponensenként alkalmazhatjuk, mint azt láthattuk az előző matekos részben.

## Miért modulálunk?

Kisebb antennák használata



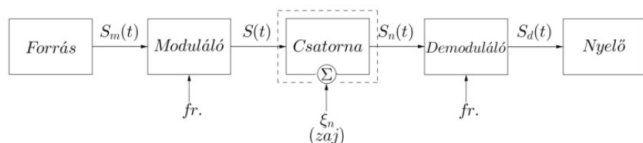
EM spektrum teljes kihasználása



Az elektromágneses (EM) spektrum egy véges erőforrás, így a lehető legnagyobb mértékben szeretnénk azt kihasználni. A modulációs tétel alapján láthatjuk, hogy az alapsávi jelünket gyakorlatilag tetszőleges frekvenciára „áthelyezhetjük”, így minden szegletét kihasználva az EM spektrumnak.

Azért is használunk nagyobb frekvenciákat, mert így csökken a hullámhosszuk, és így általában minden úgynevezett elosztott paraméterű áramköri elem is, pl. az antennák. Vagyis nagyobb frekvenciákon kisebb méretű antennákat alkalmazhatunk, ami előnyös tud lenni pl. mobiltelefonok esetén.

## Információátvitel blokkdiagram



A dián az információátvitel általános blokkvázlata látható. Valamilyen információból előállítunk egy modulált jelet, amit átküldünk egy csatornán (rádiózásban ez az éter), ahol mindenféle zavarjelenségnek van kitéve. Ezután a vevővel vesszük, majd demoduláljuk a jelet, és ha jól csináltuk, akkor ugyanazt az információt kapjuk a vevő oldalon, amit beküldtünk az adó oldalon.

## Modulációs lehetőségek

$$A \cdot \cos(\omega t + \phi)$$

Amplitúdó

Frekvencia

Fázis

Szög

A moduláció tételben szereplő két frekvenciájú jelet általában vivőnek, és moduláló jelnek hívjuk. A vivő rendszerint a nagyfrekvenciájú jel, melyet az alapsávi moduláló jel „felruház” valamilyen információtartalommal.

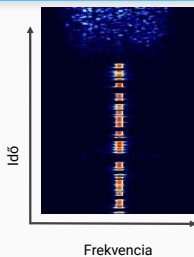
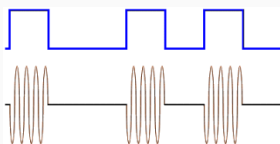
Egy szinuszjel három jellemzője az amplitúdója, frekvenciája és fázisa. Lehetne ezt 2,5 jellemzőnek is mondani, ugyanis a frekvencia és a fázis között lehet összefüggést teremteni.

Lényeg, hogy a moduláló jellel ezen három jellemző valamelyikébe „nyúlunk bele”. Ennek alapján megkülönböztetünk amplitúdó-, frekvencia- és fázismodulációt.

## CW

Continuous Wave, Morze

Két szintű amplitúdó billentyűzés (ASK)



Egyik legegyszerűbb amplitúdó moduláció az amplitúdó billentyűzés, azon belül is az OOK amikor a jel amplitúdóját nulla és valamilyen nem nulla érték között változtatjuk (On-Off Keying).

Ez talán a legrégebbi moduláció, melyet a Morze távírók használtak, illetve használnak.



## CW, Morze



### International Morse Code

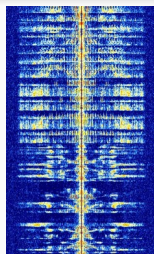
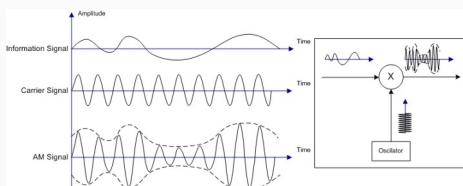
1. The length of a dot is one unit.
2. A dash is three units.
3. The space between parts of the same letter is one unit.
4. The space between letters is three units.
5. The space between words is seven units.

A	•••	U	•••••
B	•••••	V	••••••
C	••••••	W	•••••••
D	•••••••	X	••••••••
E	••••••••	Y	•••••••••
F	•••••••••	Z	••••••••••
G	••••••••••		
H	•••••••••••		
I	••••••••••••		
J	•••••••••••••	1	••••••••••••••
K	••••••••••••••	2	•••••••••••••••
L	•••••••••••••••	3	••••••••••••••••
M	••••••••••••••••	4	•••••••••••••••••
N	•••••••••••••••••	5	••••••••••••••••••
O	••••••••••••••••••	6	•••••••••••••••••••
P	•••••••••••••••••••	7	••••••••••••••••••••
Q	••••••••••~••••••••	8	••••••••••~•••••••••
R	••••••••••~•••••••••	9	••••••••••~••••••••••
S	••••••••••~••••••••••	0	••••••~•••••••••••••
T	••••••••••~•••••••••••		

A Morze ABC betűkhöz hosszú és rövid impulzusokból álló kódokat rendel. Ezek elsőre rendszertelennek tűnhetnek, de volt mögötte megfontolás: Minél gyakrabban fordul elő egy adott betű (angol szövegben) annál rövidebb kódot rendeltek hozzá. Vagyis a leggyakrabban előforduló betűk az E és a T.

## AM-DSB

$$y(t) = A_m \cdot \cos(2\pi f_m t) \cdot \cos(2\pi f_v t) + A_v \sin(2\pi f_v t)$$



A legegyszerűbb moduláció hangátvitelre a két oldalsávós amplitúdómoduláció. Itt mindössze annyi a dolgunk, hogy a moduláló jelünket (tipikusan emberi beszéd) összeszorozzuk a vivőfrekvenciával. Így a modulációs tétel értelmében a vivőfrekvencia körül megjelenik a két oldalsáv, mely a beszédet tartalmazza.

Attól függően, hogy ehhez még hozzáadjuk a vivőfrekvenciát vagy sem, megkülönböztetünk elnyomott vivőjű (SC – Supressed Carrier) és nem elnyomott vivőjű (NSC – Non Supressed Carrier) amplitúdó modulációkat.

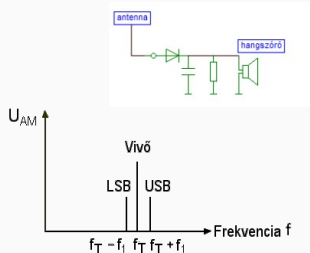
Utóbbi esetben a moduláló jelünk „ráül” a vivő tetejére, mint ahogy az a dián is látható. Ez a demodulálást rendkívül egyszerűvé teszi.

## AM-DSB

Demodulálás: Csúcsdetektorral  
Rendkívül egyszerű: Tömeges elérés

Additív zajra érzékeny

Rossz spektrumhatékonyság



Ezen a dián az AM-DSB/NSC, vagyis a nem elnyomott vivőjű AM spektrumképe látható. Jól látható a vivő frekvencia és a két oldalsáv.

Mivel ilyenkor az alapsávi jel a vivőn „rajta ül”, így demoduláláshoz mindössze „ki kell szedni alóla” a vivőfrekvenciát. Ez egy csúcsdetektorral kivitelezhető.

Ez a demodulátor rendkívül egyszerű, néhány alkatrészből összerakható, és nem igényel aktív elemeket (erősítő). Ezért tömeges elérésre kitűnően alkalmas, pl. ilyen módon sugározták a 2. világháború alatt a lakosság tájékoztatására szánt adásokat. Ma még a solti adóból sugározzák a Kossuth rádiót ezzel a modulációval 540 kHz-en.

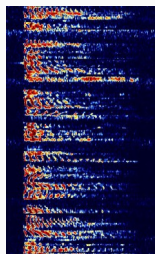
## AM-SSB

Az AM két oldalsávja ugyan azt az információt hordozza  
Nyomjuk el az egyiket!

Single Side Band

- LSB: alsó marad
- USB: felső marad

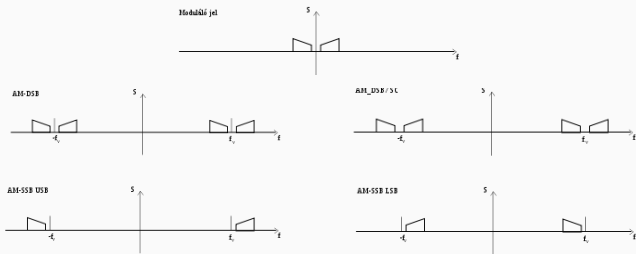
Kevesebb sávszélesség  
Rosszabb minőség  
Nehezebb demodulálás



AM-DSB esetén mindkét oldalsáv ugyanazt az információt hordozza, ezért elegendő csak az egyik oldalsávot átvinni, és azzal nem lesz információvesztésünk. Ilyenek az SSB (Single SideBand) modulációk, ahol az AM-DSB adásnak vagy a felső-, vagy az alsó oldalsávját hagyjuk meg. Előbbit USB-nek (Upper SideBand), utóbbit LSB-nek (Lower SideBand) hívjuk.

A rádióamatőrök ezeket a modulációkat használják a rövidhullámú sávokon.

## Amplitúdó modulációk típusai



A dián a különböző amplitúdó modulációk spektrumábrái láthatóak. Érdeemes megjegyezni, hogy a képeken a vivőfrekvencia nagysága néhol megtévesztő lehet. SSB modulációknál nem szokott ennyire nagy szintű lenni, illetve az AM-DSB/SC modulációnál sosincs teljesen elnyomva, mert a vivőből egy minimális mennyiségűre szükség van a jel demodulálásához.

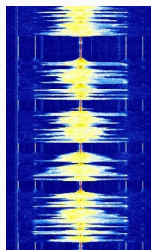
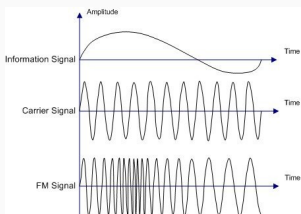
## FM – Frekvencia moduláció

A frekvencia változik a moduláló jel függvényében

Jó a zajtűrése

Demodulálás:  
Fázisdiskriminátor  
Fáziszárt hurok

Hasonló a  
fázismodulációhoz  
(PM)



A vivő egy másik tulajdonsága amit manipulálhatunk, az a frekvenciája. Ezt frekvenciamodulációnak nevezünk, és ilyenkor a vivő frekvenciája a moduláló jel pillanatnyi amplitúdójának megfelelően változik.

Ez a moduláció előnyösebb az AM-nél, mert nem az amplitúdó hordozza az információt (ami elég érzékeny additív zajokra), hanem a nullátmenetek sűrűsége (vagyis a frekvencia). Ez a módszer gyakorlatilag érzéketlen az additív zajokra.

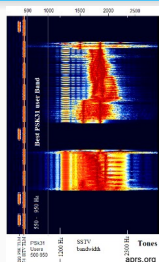
A moduláló jel amplitúdója és a vivőfrekvenciától való eltérés arányát frekvencialöketnek hívjuk, és ezzel jellemezhetjük FM adásainkat. Megkülönböztetünk keskeny-, és szélessávú FM-et.

Ennek az adásnak a demodulálásához már komplexebb áramkörök kellene, de a jó átviteli minőség miatt (főleg szélessávú FM) megéri ilyeneket építeni.

Nagyon hasonló a fázismodulációhoz (PM). Analóg esetben annyi a különbség, hogy a vivő „sűrűsödése” és „ritkulásai” időben valamivel elvannak csúszva az FM esethez képest.

## SSTV – Slow Scan Television

Analóg képátvitel alacsony sávszélességen, 1-2 perc alatt  
50-es évektől, űrszondákon  
Jellemzően HF sávokon (DX), vagy VHF/UHF sávokon



Az SSTV-t arra találták ki, hogy kisebb sávszélességen lehessen képanyagot átvinni, mint a hagyományos analóg televízió, természetesen alacsonyabb képfrissítési frekvenciával.

Legelőször arra használták, hogy űreszközökről sugározzanak képeket. Neil Armstrong első Holdon tett lépéseit is SSTV-vel közvetítették.

Manapság ez a képátviteli módszer főként rádióamatőr körökben használatos.

[https://en.wikipedia.org/wiki/Slow-scan\\_television](https://en.wikipedia.org/wiki/Slow-scan_television)

## Digitális modulációk

Analóg jel helyett biteket viszünk át

**Szimbólumok:** egyszerre egy szimbólum megy át, ez kódolhat több bitet  
Pl. 4 különböző szimbólum: 2 bit/sym

**Baud ráta:** Szimbólumsebesség (sym/sec)

**Bitráta:** Bitsebesség = sym/sec \* bit/sym = bit/sec  
(Szimbólumsebesség \* Szimbólum által kódolt bitszám)

Digitális modulációnál nem folytonos analóg jelet (pl. hangot) viszünk át, hanem diszkrét értékekből álló jelet, mellyel biteket kódolunk.

Digitális átvitelnél új fogalomként megjelenik a szimbólum. Egy szimbólum adott esetben egyszerre több bitet is kódolhat, így különbséget kell tennünk a szimbólumsebesség és a bitsebesség között.

Megjegyzés: A szimbólumszám növelése nem befolyásolja a használt sávszélességünket, a szimbólumsebesség növelése viszont igen. Vagyis ha szeretnénk gyorsabban információt átvinni, akkor a szimbólumok számának növelésével ezt ugyanakkora sávszélességen megtehetjük. Persze ezt csak addig játszhatjuk, amíg a vevőnkkel képesek vagyunk megbízhatóan különbséget tenni a szimbólumok között.

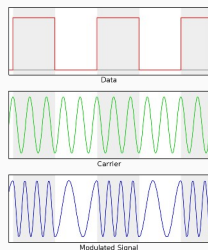


## FSK – Frequency Shift Keying

Frekvencia billentyűzés

Egy szimbólum: adott frekvenciájú jel

Relatív frekvenciák és a baud rate határozzák meg a pontos módot



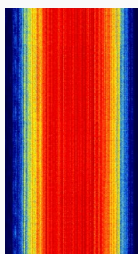
A digitális modulációk közül talán a legkönnyebben érthető a frekvenciabillentyűzés.

Itt minden egyes szimbólumhoz valamilyen frekvenciájú jelet rendelünk. Értelmszerűen, minél több a frekvenciák száma, annál nagyobb a szimbólumszámunk.

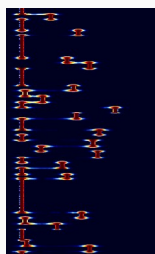
## FSK vizesés diagramok



Radio teletype  
RTTY, rütyütyü



GMSK (képen GSM)  
Gaussian Minimum Shift  
Keying



JT65C2

Néhány FSK modulációnak a vizesés diagramja (vízszintes tengely: frekvencia; függőleges tengely: idő):

Az RTTY módot az amerikai haditengerészet és pari őrség előszeretettel használta, manapság már csak rádióamatőr körökben használatos.

A GSM (2G) mobilrendszer az FSK egy speciális módját, a GMSK-t használja, ezzel jobb spektrumhatékonytságot elérve.

A JT65 egy rádióamatőrök által kifejlesztett protokoll, amit csak ők használnak. A 65 a szimbólumszámra utal, a C2 a használt módra.

<https://www.sigidwiki.com/wiki/JT65>

## PSK – Phase Shift Keying

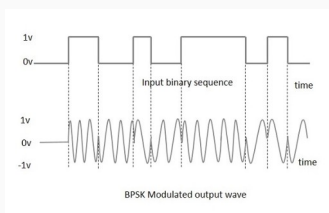
Fázisbillyentyűzés

Egy szimbólum: adott fázisú jel

A fázis relatív => ref szimbólum/diff kódolás

Szimbólumok számától függően

BPSK, QPSK, 8PSK



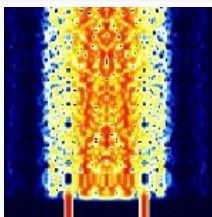
Fázisbillyentyűzésnél a különböző szimbólumokat a vivő különböző fázisai jelentik. Ezt változtatgatjuk, így a vivőnk nem egy folytonos szinusz lesz, hanem szimbólumváltáskor lesznek benne „ugrások”.

A fázis egy relatív dolog, mindig csak valamihez viszonyítva tudjuk értelmezni. Ezért ilyenkor differenciális kódolást szokás használni, ami annyit jelent, hogy nem az éppen látott jel fázisát nézzük, hanem a váltásokkor megnézzük, hogy mennyivel változott a jel fázisa, és a szimbólumainkat a különböző mértékű „ugrásokhoz” rendeljük.

## PSK – Vízesés diagramok



BPSK31



BPSK250



QPSK31

Amatőr körökben általában bináris (BPSK - kétállapotú), vagy kvadratúra (QPSK - négyállapotú) fázisbillentyűzést használnak. Itt ezeknek néhány vízesésdiagramja látható.

Az egyes módok végén a szám az átviteli sebességre utal. Figyeljük meg, hogy az azonos szimbólumszám ellenére a BPSK250 jóval nagyobb sáv szélességet foglal mint a BPSK31. Ez a gyorsabb szimbólumidőnek köszönhető.

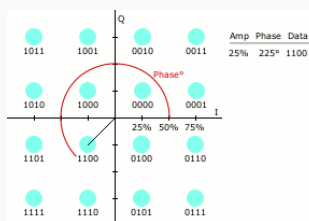
Ellenben a BPSK31 és QPSK31 nagyjából ugyanazt a sáv szélességet foglalja el. Ennek oka, hogy bár a szimbólumszám az utóbbinál nagyobb, a szimbólumidők megegyeznek.

## QAM – Quadrature Amplitude Modulation

Kvadratúra Amplitúdó Moduláció

Van még hely a konstelláció ábrán  
Külön külön amplitudó moduláljuk I-t és Q-t

16, 64, 256 QAM  
DOCSIS, WiFi, DVB-T/C stb.



A digitális modulációknak egy másik széles körben használt fajtája a kvadratúra amplitúdó moduláció. Itt két ortogonális vivőt (emlékezzünk vissza az ortogonalitás lényegére!) modulálunk egyszerre, így ugyanazon a frekvencián lényegében létrehoztunk két független csatornát, amit külön manipulálhatunk. Ezeket a vivőket bázisvektorokként használva, lényegében egy koordináta rendszerben (IQ diagramon) tetszőleges vektort hozhatunk létre.

A QAM állapotszáma rendszerint kettő valamilyen hatványa. Az alacsonyabb állapotszámú verziókat (256, 64 és alatta) szinte napi szinten használjuk, amikor Wi-Fi-n keresztül kommunikálunk. Nagyobb állapotszámú rokonait (1024, 4096) pedig a modern kábeltévé szabványokban láthatjuk viszont.

## IQ Jelek

Hogyan is állnak elő az előző konstellációs diagramok?

$$\underbrace{[(U_v+m(t)) \cdot \cos(\omega_v t)]}_{\text{Modulált jel}} \cdot 2 \cos(\omega_v t + \phi) = \underbrace{(U_v+m(t))}_{\text{Alapsáv}} \cdot \underbrace{\cos(\phi)}_{\text{Alapsáv}} + \underbrace{(U_v+m(t)) \cdot \cos(2\omega_v t + \phi)}_{\text{Kétszeres frekvencia (kiszűrjük)}}$$

↑ Szorzó demodulátor      ↑ Skálázási tényező

Az IQ jelek mögött rejlő matek megértéséhez, először vizsgáljunk egy egyszerű szorzó modulátorral és demodulátorral továbbított jelet.

Az **alapsávi jelünket** megszorozzuk a vivőfrekvenciával, így előáll a **modulált jelünk**. A demoduláláshoz ezt ismét megszorozzuk a **vivőfrekvenciával**, melynek lehet valamilyen  $\phi$  fázishibája az eredeti vivőhöz képest.

Ennek eredményeként először is előáll a **kétszeres frekvencia** (emlékezzünk a modulációs tételre). Ennek számunkra nincs haszna, úgyhogy ettől szűrés útján megszabadulunk.

Emellett előáll az **alapsávi jelünk** is, egy  $\cos(\phi)$  **skálázási tényezővel** megszorozva. Ez azt jelenti, hogy ha a szorzó demodulátor jele tökéletesen fázisban van a vivővel ( $\phi=0$ ), akkor visszkapjuk a teljes alapsávi jelet ( $\cos(0)=1$ ). Ha viszont a fázistolás pont  $90^\circ$ , akkor  $\cos(90^\circ)=0$ , tehát a demodulálás eredményeként nem kapunk semmit.

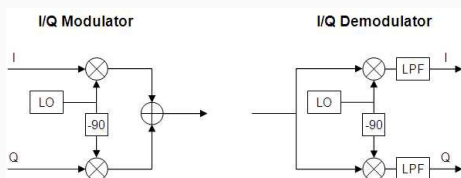
## IQ Jelek

$$A \sin(\omega t) \cdot \sin(\omega t) \Rightarrow \frac{1}{2} A$$

$$A \cos(\omega t) \cdot \cos(\omega t) \Rightarrow \frac{1}{2} A$$

$$A \cos(\omega t) \cdot \sin(\omega t) \Rightarrow 0$$

$$A \sin(\omega t) \cdot \cos(\omega t) \Rightarrow 0$$

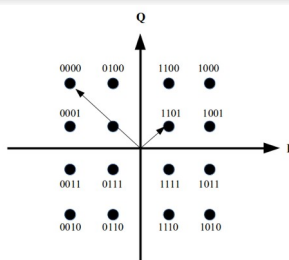
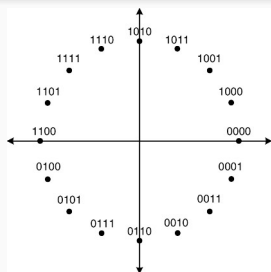


Leleményes mérnökök megoldották, hogy a demodulálást  $\phi=0$  fázishibával lehessen produkálni, és így lehetőségük volt ugyanarra a csatornára még egy,  $90^\circ$ -kal eltolt vivőfrekvenciát kisugározni, mivel ezt a kettőt demodulálásnál megbízhatóan szét lehet választani.

Ennek az egésznek az alapja az, hogy a koszinusz és szinusz függvények ortogonálisak, vagyis függetlenek egymástól. Emlékezzünk az előadás elejére: A descartes koordináta rendszereknél a bázisvektorok merőlegesek voltak ( $90^\circ$ -kal elforgatva egymáshoz képest), és ezen vektorok meghosszabbításaira (tengelyekre) vetítettük le forgóvektorok segítségével a koszinusz és szinusz függvényeket.

Vagyis ebből következik, hogy a koszinusz és szinusz függvények is ortogonálisak. Ennek, mint most láthattuk, hatalmas gyakorlati jelentősége van.

## Most már értjük a konstellációs diagramot

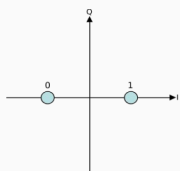


Ennek alapján most már értjük a konstellációs diagramok előállításának módját. Fogjuk az I (fázis jel, koszinuszos vivőt szorozza) és Q (kvadratura jel, szinuszt szorozza) jeleinket, és ezekkel szorozva a bázisvektorainkat (koszinusz és szinuszos vivők) szabadon eljuthatunk az IQ sík tetszőleges pontjába, mint bármelyik más derékszögű koordináta rendszerben.

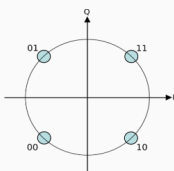


## PSK - Konstellaációs diagramok

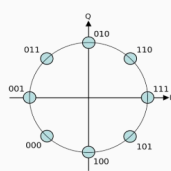
PSK esetén a fázor fázisa tartalmaz minden információt  
Ábrázoljuk a szimbólumokhoz tartozó fázorokat:



BPSK



QPSK



8PSK

Ha a PSK szimbólumokat konstellaációs diagramon helyezük el, láthatjuk, hogy azok egy kör mentén helyezkednek el. Ha visszaemlékezünk a koordináták poláris ábrázolásához, akkor könnyű látni, hogy a szimbólumokhoz mutató vektor hossza mindig megegyezik (lévén kör mentén találhatóak), csak a fázisuk (vektor vízszintes tengellyel bezárt szöge) különbözik egymástól. Ezért hívjuk fázisbillentyűzésnek.

A konstellaációs diagramok lényegéről a későbbi diákon.

## Szoftverrádió elmélet

$$A(t) \cdot \sin[\omega t + \phi(t)]$$

↓

$$\underbrace{A(t) \cdot \sin(\omega t) \cos[\phi(t)]}_{\text{Fázis}} + \underbrace{A(t) \cdot \cos(\omega t) \sin[\phi(t)]}_{\text{Kvadratúra}}$$

Tetszőleges szinuszos jel felbontható fázis-kvadratúra komponensekre  
IQ (de)modulátor + Digitális jelfeldolgozás = Szoftverrádió

A dolog tovább fokozható, ugyanis tetszőleges szinuszos jel felbontható fázis és kvadratúra komponensekre. Így nem csak a digitális adások állíthatók elő, illetve demodulálhatók ezzel a módszerrel, hanem (kellő ügyességgel) tetszőleges modulációt előállíthatunk IQ jelek segítségével.

[https://en.wikipedia.org/wiki/In-phase\\_and\\_quadrature\\_components](https://en.wikipedia.org/wiki/In-phase_and_quadrature_components)

Ez a módszer nagyban hozzájárult a (főleg mobiltelefonos) rádióhálózatok nagy ütemű fejlődéséhez, hiszen nagyon egyszerűen és költséghatékonyan tesztelhetők velük új modulációs eljárások.

## RTL-SDR szoftverrádió



Szoftverrádiós gyakorlat a tanfolyam vége felé  
Saját FM demodulátor írása

Ezzel eljutottunk a szoftverrádióig, melyek olyan vevők, amik kimenetükön számunkra IQ jeleket biztosítanak, mi pedig szabadon feldolgozhatjuk azokat, így tetszőleges vevőt megvalósítva. Ennek kipróbálására lehetőség lesz a tanfolyam egy későbbi gyakorlati alkalmán.

Amennyiben kicsit többet vagyunk hajlandóak költeni, úgy vehetünk olyan szoftverrádiót, mely mindezt a „másik irányba” is tudja. Így IQ jelekből összerakott, tetszőleges rádióadást tudunk készíteni.

## Összefoglalás – Kérdések?

- Modulációk
  - Modulációs tétel
  - CW
  - Fónia: AM, FM
  - Digitális: FSK, PSK, QAM
  - Analóg képátvitel: SSTV
  - IQ (de)moduláció

Ha valakiben maradt még kérdés, akkor nyugodtan forduljatok hozzánk, akár e-mailben, akár discord szerverünkön!