

Az emberi test mint jelforrás

Jelfeldolgozás

G.Schay

Az emberi test mint jelforrás

Jelek az orvostudományban

Jelek információtartalma

Detektorok, kódolás

Példákon keresztül!

Az információ fogalma (példával)

Intuitívan

"informare" (Lat.) : „**az elmét formálni**”, tanítani, utasítani valakit

Azaz: akkor tudunk tanulni, vélekedésünket megváltoztatni, ha *információhoz* jutunk

vagy:

„egy eszközbe vagy élőlénybe bevitt jel, mely választ vált ki”

(Pl. Pavlovi reflex: táplálék illata → nyáleválasztás, mozdulatok)

vagy:

„ az információ olyan mintázat amely más mintázatok kialakulását befolyásolja”

(Pl. DNS szekvencia → fehérje szerkezet)



Bárcsak olyan nyugodt lehetnék mint J.B. amikor fontos döntésekről van szó!

Információelmélet

Az információ fogalma (példán keresztül)

Adatok, adatfolyamok információtartalma, kódolás, továbbítás

Információ és entrópia



Bárcsak olyan nyugodt lehetnék mint J.B. amikor fontos döntésekről van szó!

Információ átvitel – információ tartalom

Esemény és információ:
„mi történt?”

Az egyes események információtartalma eltérő

-megint dugó van reggel

-holnap esni fog.

-nyertem a lottón!

Hogyan *kódolhatjuk* az információt?
Mi kell az információátvitelhez?



Információátvitel - kódolás

általánosságban

Információ forrás



**(át)vevő
cél(pont)**

A lehetséges események közül
melyik következett be?

(hír)

Információátvitel - kódolás

általánosságban

Információ forrás



Átviteli csatorna



**(át)vevő
cél(pont)**

A lehetséges események közül
melyik következett be?

(hír)

Információátvitel - kódolás

általánosságban

Információ forrás

A lehetséges események közül
melyik következett be?

kódolás

eseményeket SZÁMOKKAL reprezentálunk

↓
Átviteli csatorna

dekódolás

SZÁMOKBÓL visszaállítjuk az **eseményeket**

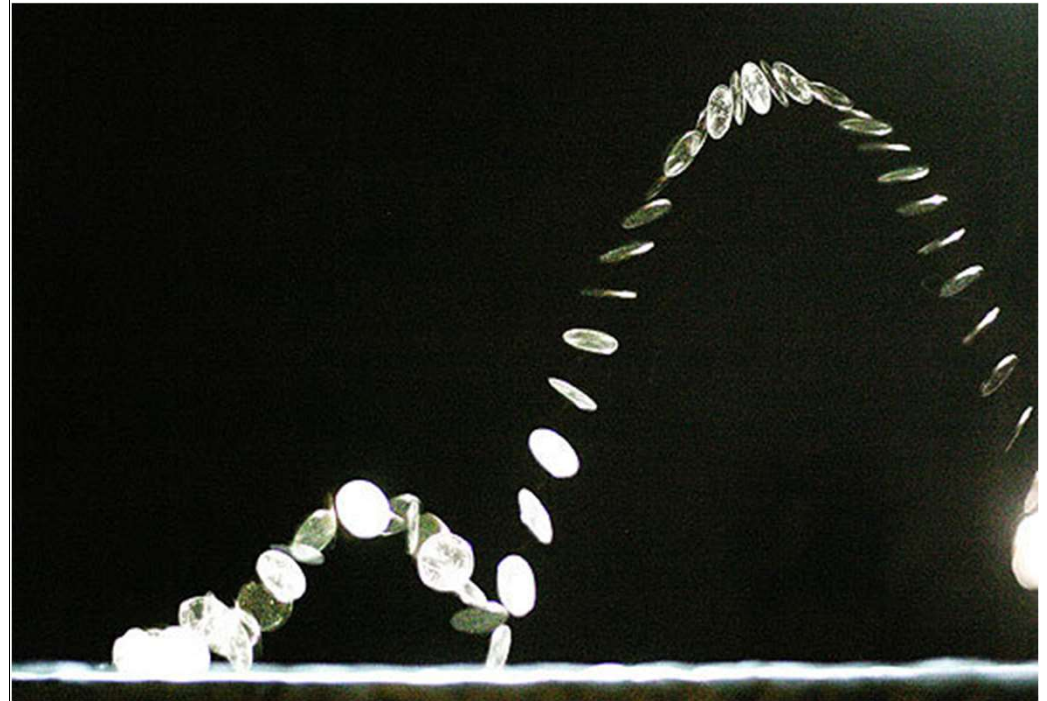
↓
**(át)vevő
cél(pont)**

(hír)

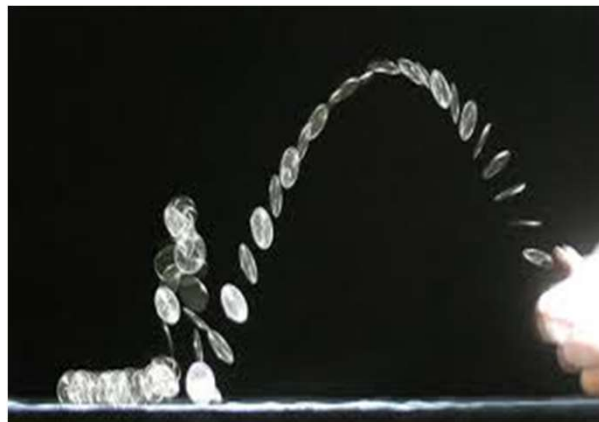
Információátvitel - kódolás



példa
Fej vagy írás?



Információátvitel – digitális kódolás



| Esemény | szám | digitális kód |
|---------|------|---------------|
|---------|------|---------------|



1

1

0

0



1

001

2

010

3

011

4

100

5

101

6

110

Információátvitel - kódolás

általánosságban

Információ forrás

A lehetséges események közül
melyik következett be?

kódolás

eseményeket SZÁMOKKAL reprezentálunk

↓
Átviteli csatorna

dekódolás

SZÁMOKBÓL visszaállítjuk az **eseményeket**

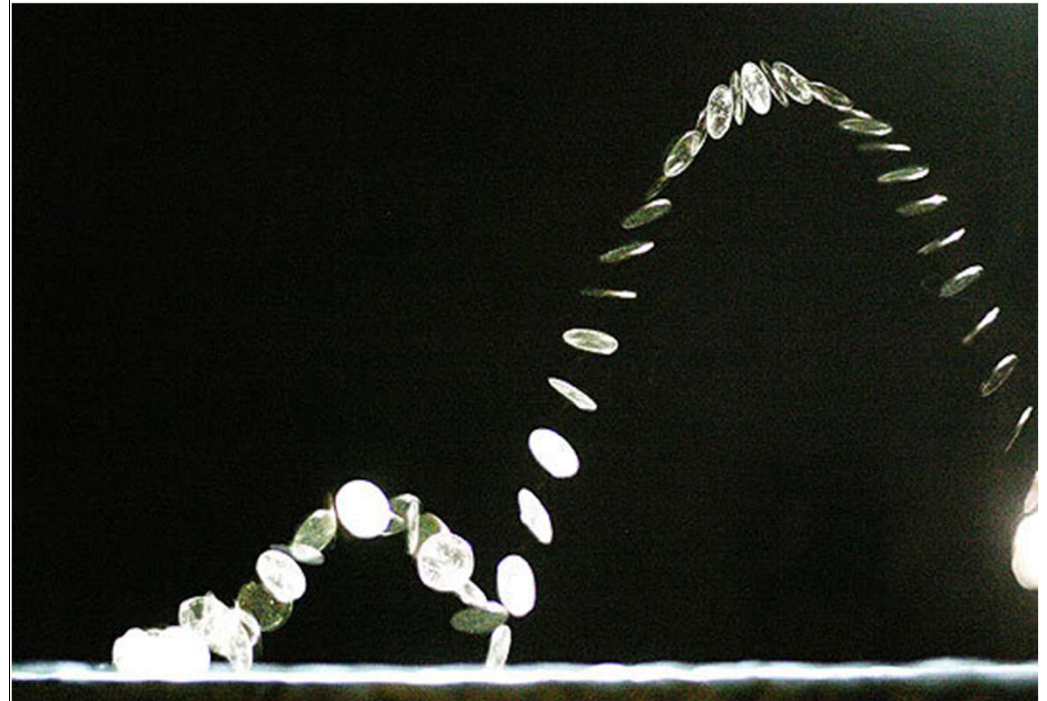
↓
**(át)vevő
cél(pont)**

(hír)

Információátvitel - kódolás



példa
Fej vagy írás?



Információátvitel - kódolás



információátvitel – az információ mértéke

Intuitíven: annak van nagyobb információtartalma ami ritkán történik meg, vagy nem tudjuk előre

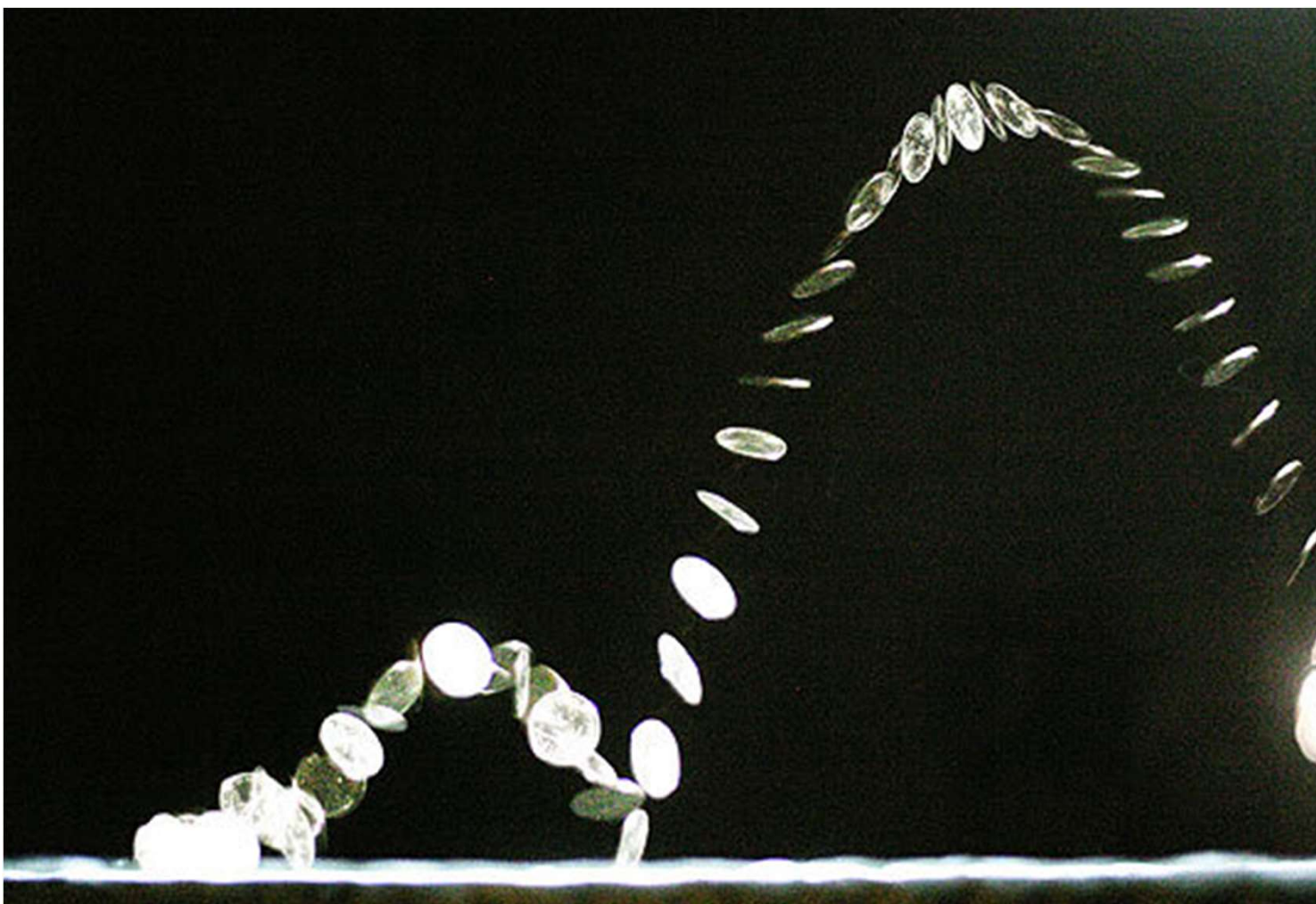
Shannon :

$$H = p \cdot \log_2 \left(\frac{1}{p} \right)$$

H az átlagos, várható információtartalmat adja meg, ez hozható kapcsolatba a kódolással. Szokás megadni egyetlen esemény információtartalmát is (I):

$$I = \log_2 \left(\frac{1}{p} \right)$$

Ezzel $H = p \cdot I$, azaz a bekövetkezési valószínűséggel súlyozott információtartalom.



$$H = P_{fej} * \log_2 \frac{1}{P_{fej}} + P_{írás} * \log_2 \frac{1}{P_{írás}} = \frac{1}{2} * \log_2 \frac{1}{\left(\frac{1}{2}\right)} + \frac{1}{2} * \log_2 \frac{1}{\left(\frac{1}{2}\right)} = 1 [Bit]$$

az információ mértéke - entrópia

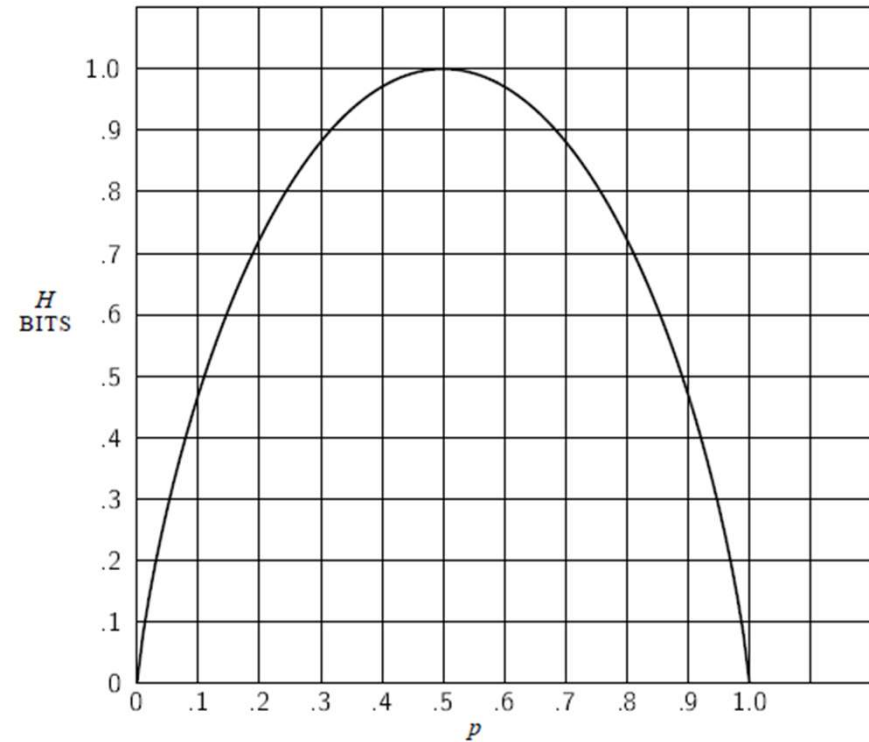
Fej vagy írás



p



$q = 1-p$



$$H = \sum_i -p_i \cdot \log_2 p_i = -p \cdot \log_2 p - q \cdot \log_2 q = -p \cdot \log_2 p - (1-p) \cdot \log_2 (1-p)$$

az információ mértéke - entrópia

Fair érme: $p = \frac{1}{2}$

Nincs előfeltevés,
Maximális bizonytalanság

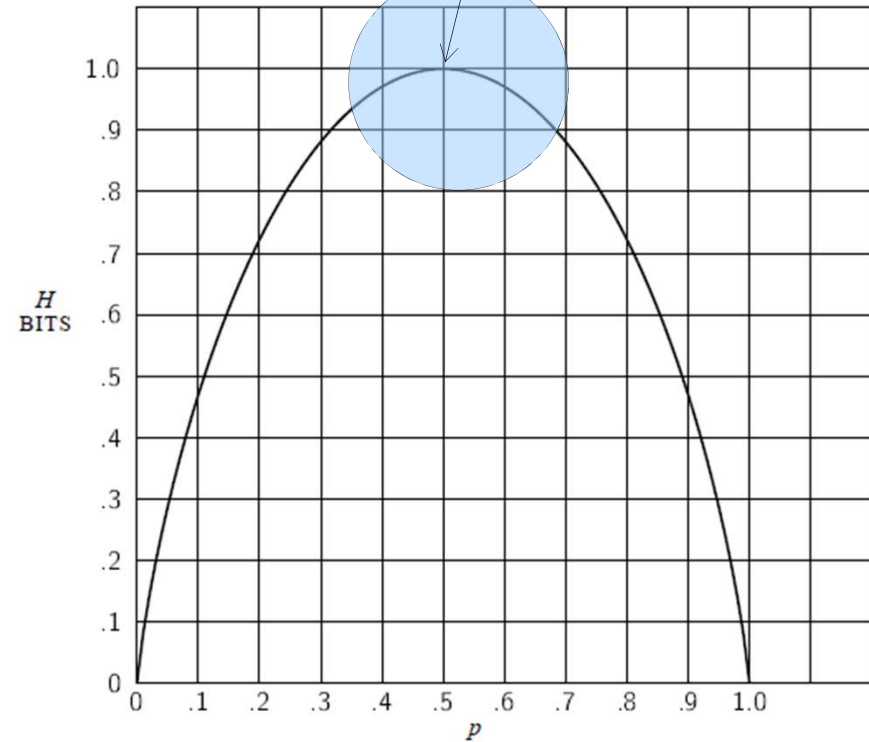
Fej vagy írás



p



$q = 1-p$



$$H = \sum_i -p_i \cdot \log_2 p_i = -p \cdot \log_2 p - q \cdot \log_2 q = -p \cdot \log_2 p - (1-p) \cdot \log_2 (1-p)$$

az információ mértéke - entrópia

Fair érme: $p = \frac{1}{2}$

Nincs előfeltevés,
Maximális bizonytalanság

Fej vagy írás

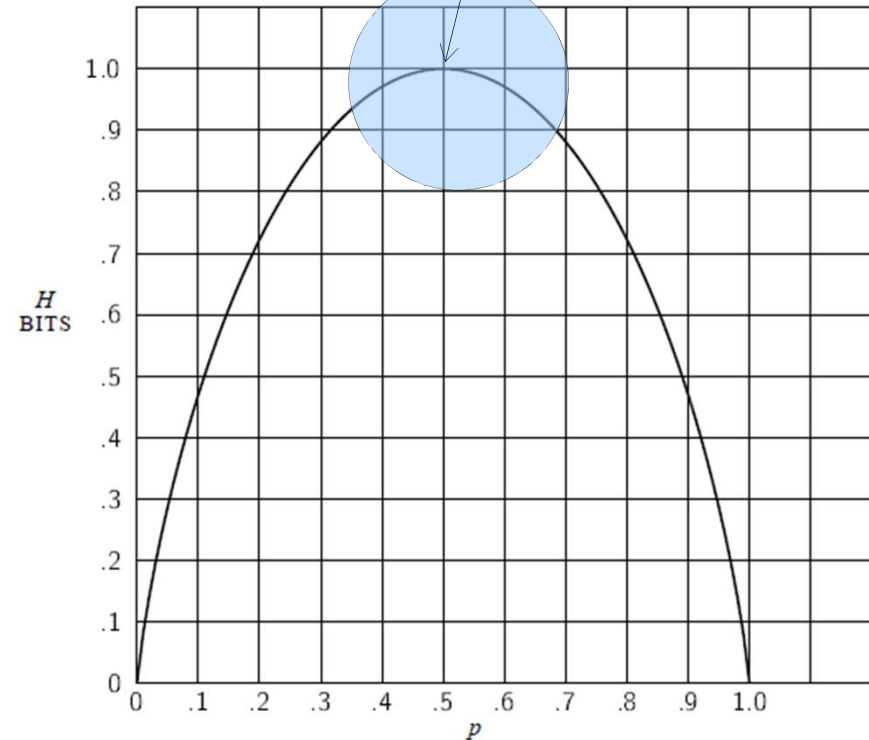


p



$q = 1-p$

H másik neve: **Shannon-entrópia**



H akkor **maximális** ha semmit sem tudunk előre azaz minden eseményhez egyforma $p_i (= 1/n)$

Minden lehetőség egyformán valószínű, legtöbbféle előfordulást látjuk



A fizikai entrópia (S) maximuma is ott van ahol a mikroállapotok száma maximális

Jel az ami **Információt** hordoz.

Beszédben:

Információ : amit mondani szeretnénk.

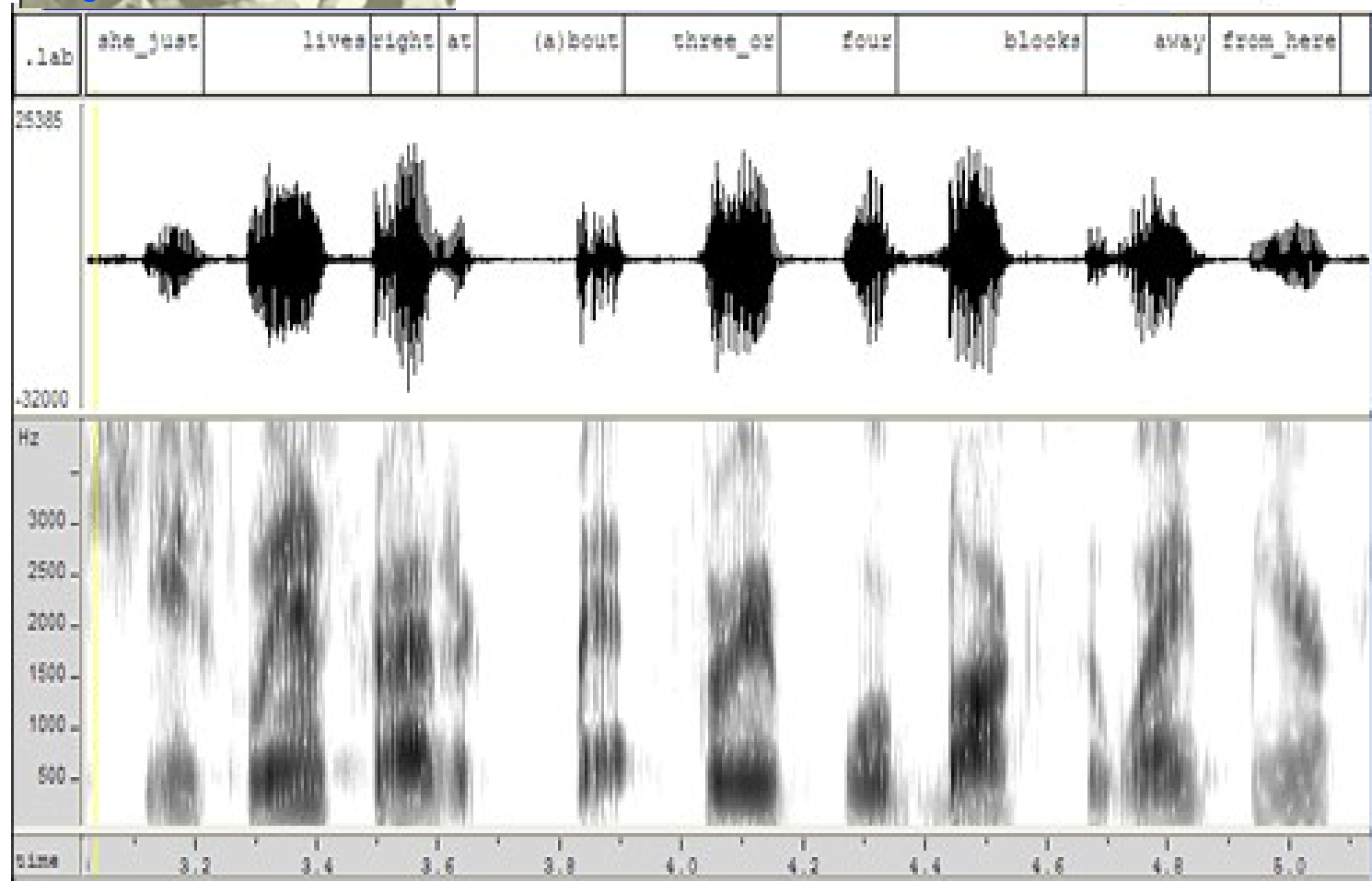
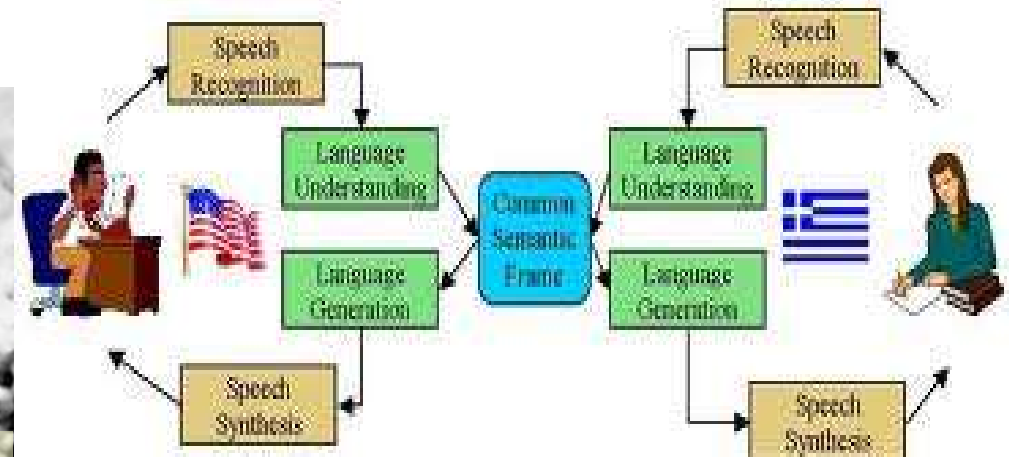
Jel:

- hang: nyomáshullám
- **kódolás**: elektromos jellé: mikrofon

- **kódolás**: nyelvtan, fordítás

- **dekódolás**: elektromos -> hanghullám

- **dekódolás**: szövegértés



Orvosi jelfeldolgozó lánc

Páciens mint
információforrás



transducer

kódolás

erősítő

Elektromos
jel

Bármilyen jel
(elektromos vagy nem)

Analóg oldal (ma már ritka)

kódolás

Signal
selection

Display

A/D
Conversion

computer

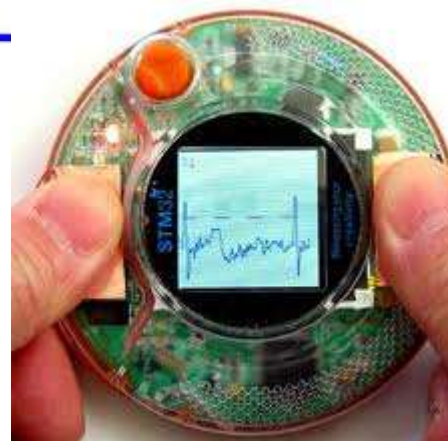
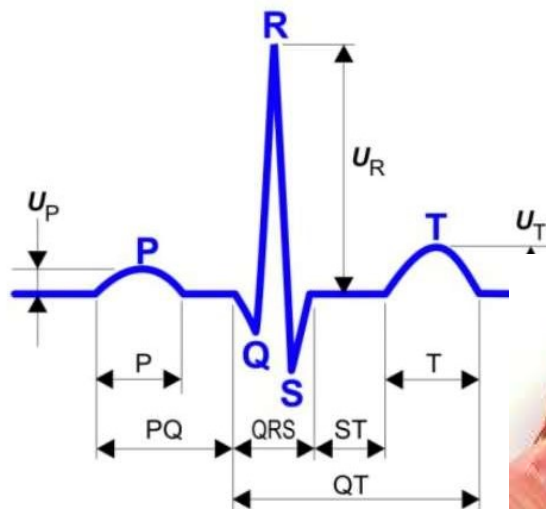
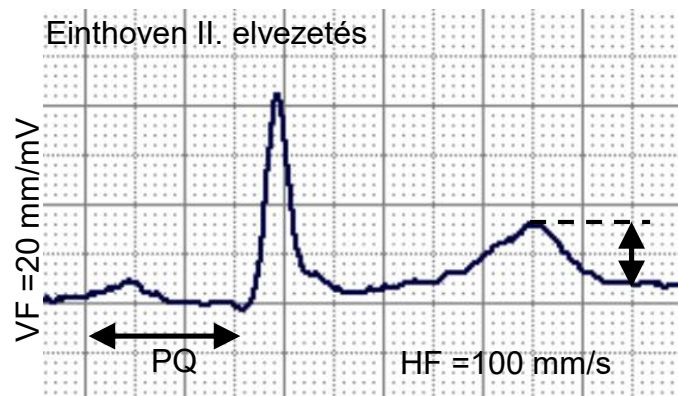
kódolás

Digitális útvonal



Dekódolás
döntés
diagnózis

Orvosi jelek



Információ: szívciklus

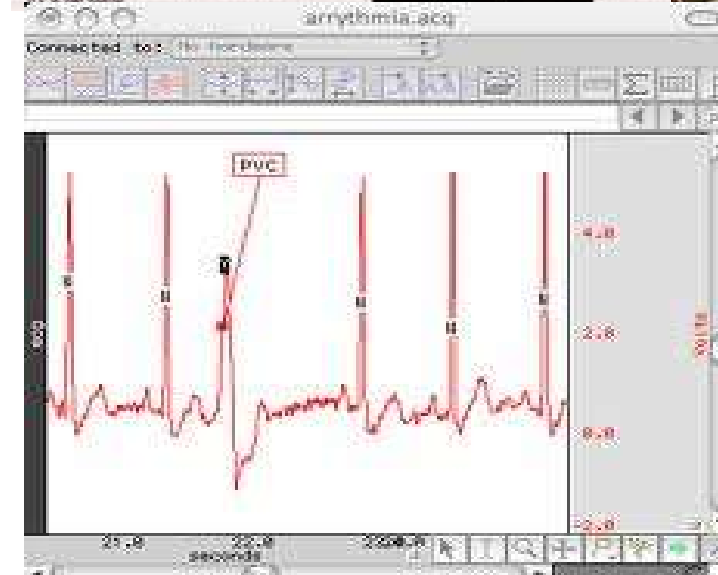
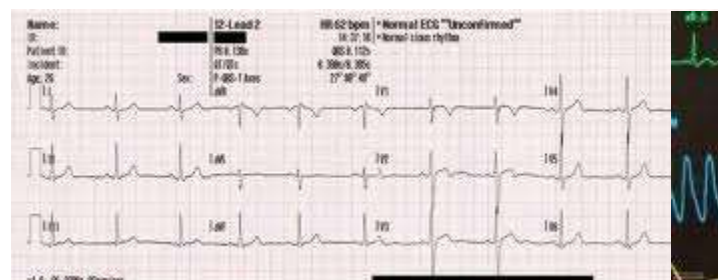
EKG: Elektro-Kardiográfia

Jel: elektromos feszültség

kódolás: nincs (de értelmezni azért kell)

Szűrésre van szükség

A zajt el kell távolítani



Orvosi jelek

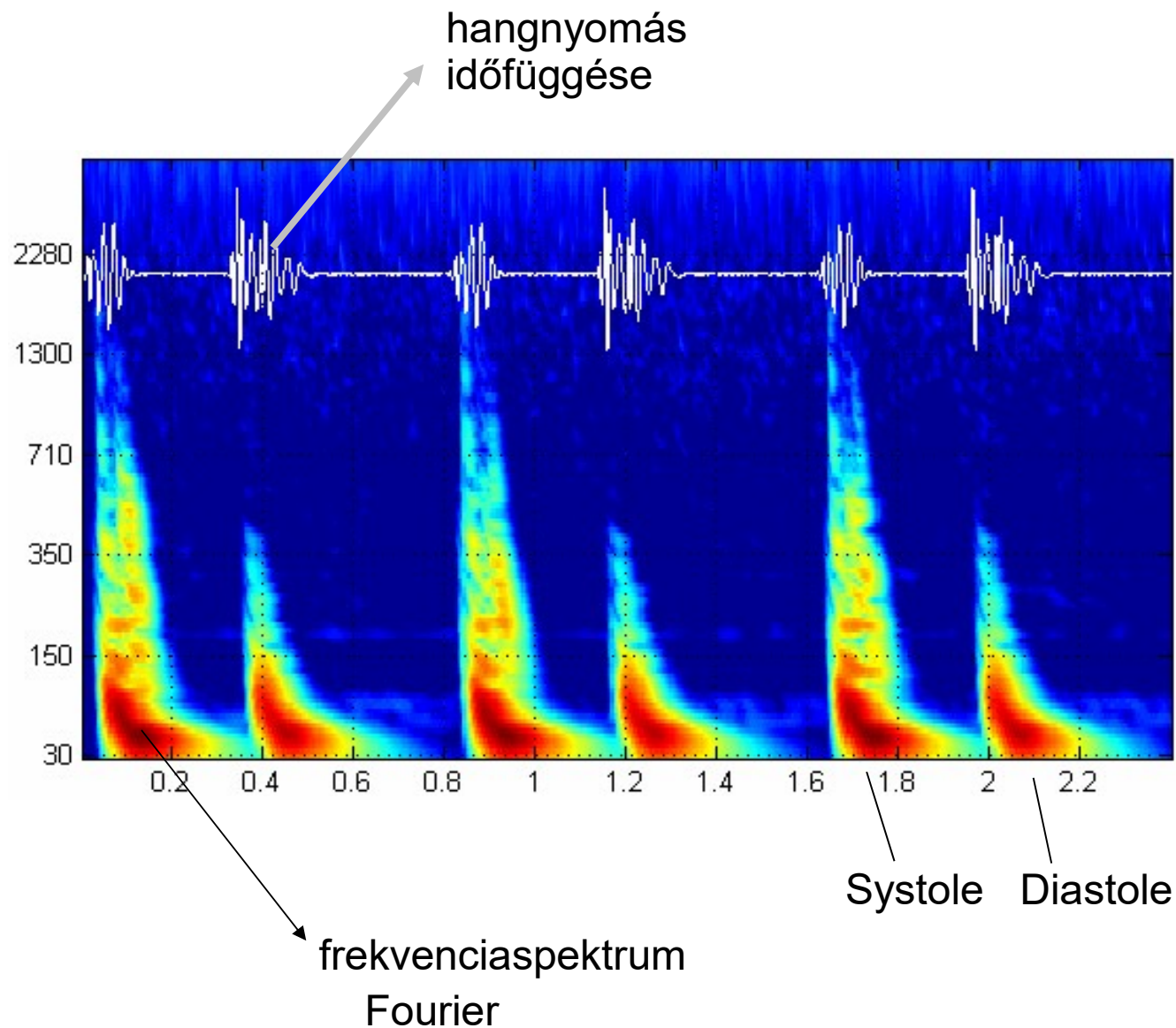
szívhangok

jel:

Hanghullámok

kódolás: elektromos jel (mikrofon)

kódolás: frekvencia-spektrum
(színkódolt)



információ: szívciklus, áramlási viszonyok

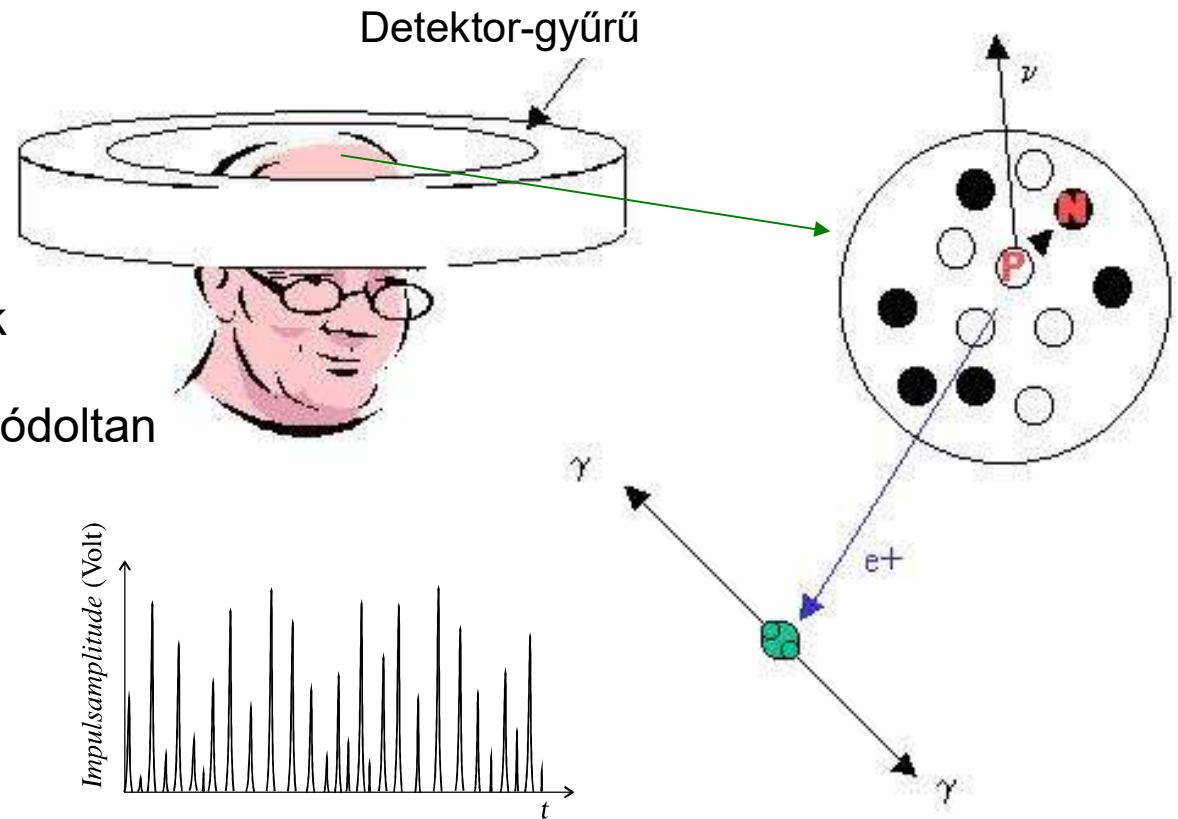
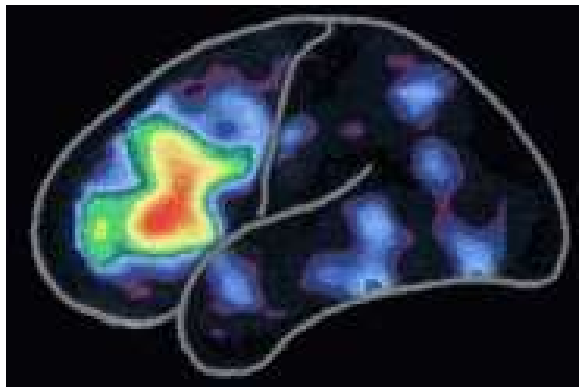
Orvosi jelek

PET: Pozitron Emissziós Tomográfia

jel: γ -fotonok

kódolás: elektromos impulzusok

kódolás: tomográfiás kép színkódoltan
(koncentráció viszonyok)

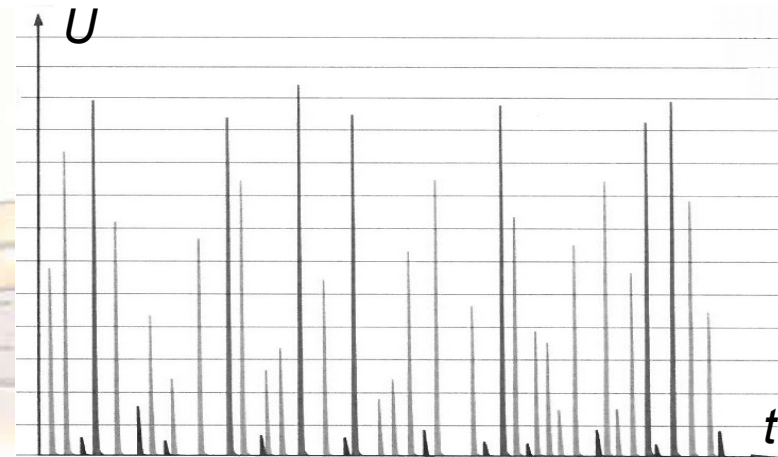


információ: hol és milyen koncentrációban van a jelzett molekula jelen.

Orvosi jelek

SPECT-CT:
Single Photon Emission
Computed Tomography

Computer Tomography



jel:

γ -fotonok , Rtg-fotonok

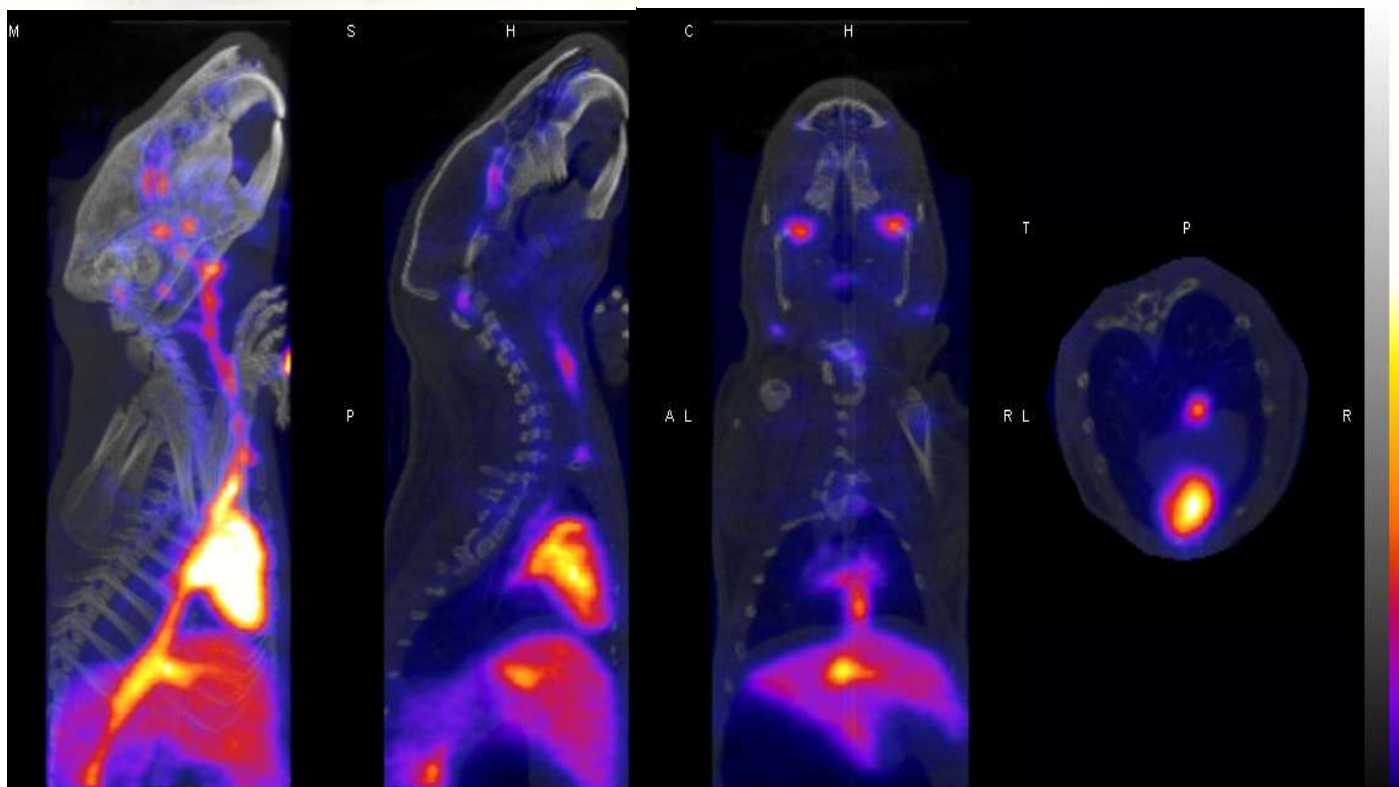
kódolás: elektromos impulzusok

kódolás: színezett és szürke-
skálás képek egymásra vetítve

Információ:

Anatómia (Rtg. kép)

Izotópdiagnosztika (tumor, stb.)

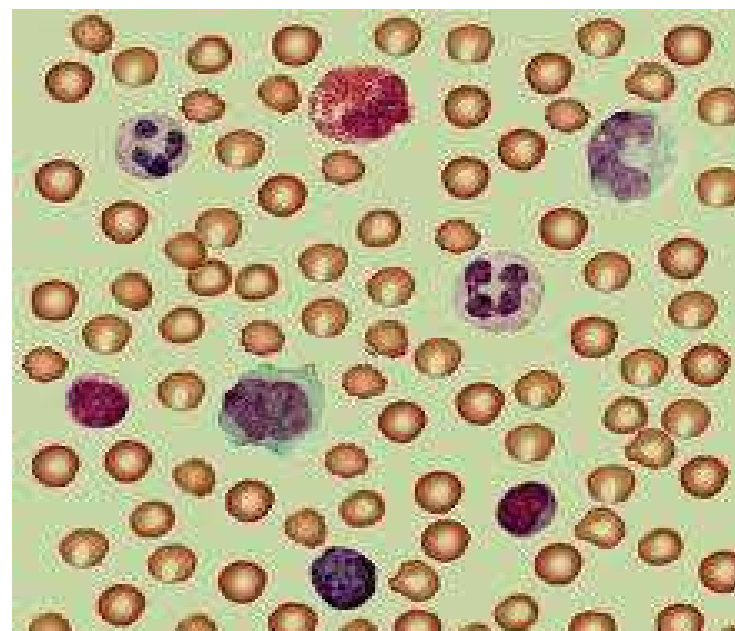
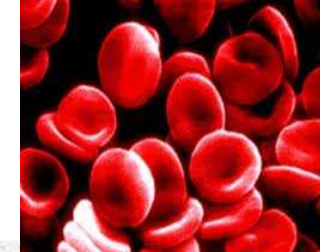


Orvosi jelek

Sejtes elemek a vérben

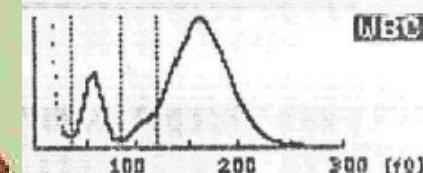
jel: sejtek mérete és koncentrációja
kódolás: elektromos impulzusok
(a mérőcellán átfolyó áramból)

kódolás: hisztogram

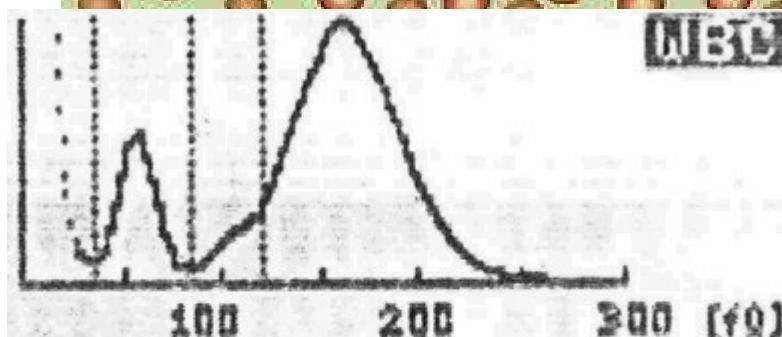


No. 3524
DATE: 93/ 3/30 09:22
MODE: WHOLE BLOOD

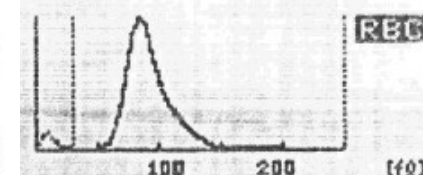
| | |
|------|--------------------------|
| WBC | 7.5x10 ³ /μl |
| RBC | 3.64x10 ⁶ /μl |
| HGB | 11.8 g/dl |
| HCT | 33.1 % |
| MCV | 90.9 fl |
| MCH | 32.4 pg |
| MCHC | 35.6 g/dl |
| PLT | 158x10 ³ /μl |



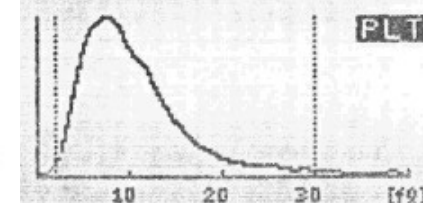
| | | |
|--------|-------------------------|---|
| LYMPH% | 16.2 | % |
| MXD % | 6.7 | % |
| NEUT% | 77.1 | % |
| LYMPH# | 1.2x10 ³ /μl | |
| MXD # | 0.5x10 ³ /μl | |
| NEUT# | 5.8x10 ³ /μl | |



| | | |
|--------|-------------------------|---|
| LYMPH% | 16.2 | % |
| MXD % | 6.7 | % |
| NEUT% | 77.1 | % |
| LYMPH# | 1.2x10 ³ /μl | |
| MXD # | 0.5x10 ³ /μl | |
| NEUT# | 5.8x10 ³ /μl | |



RDW-SD 38.1 fl



| | | |
|-------|------|----|
| PDW | 14.0 | fl |
| MPV | 10.5 | fl |
| P-LCR | 31.1 | % |

információ: sejtes összetétel
(koncentrációk)

Orvosi képfeldolgozás alapjai

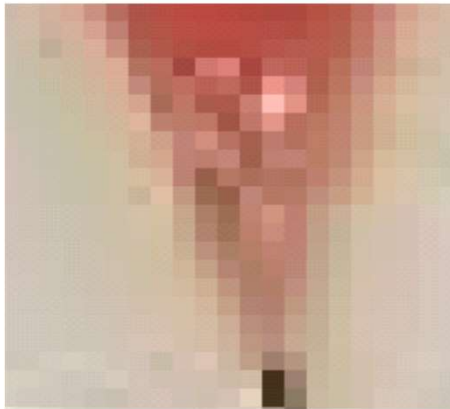
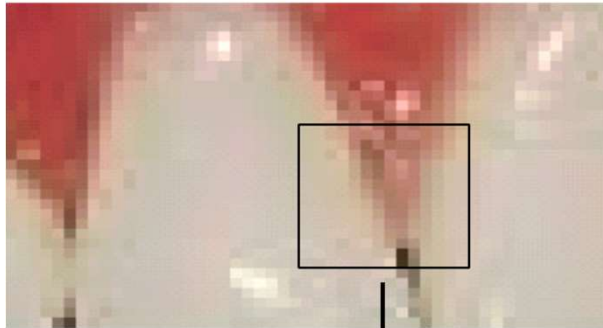
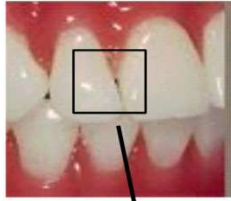
pixel

voxel

kép

tomogram

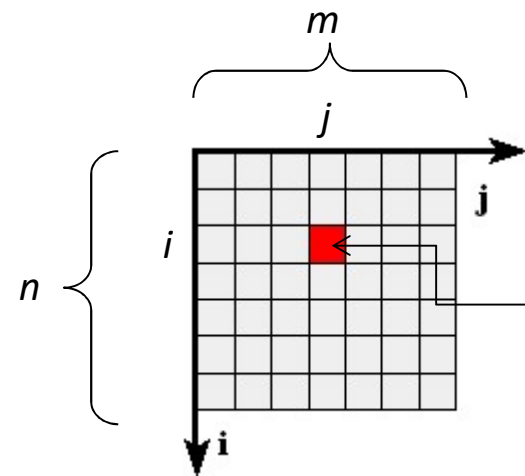
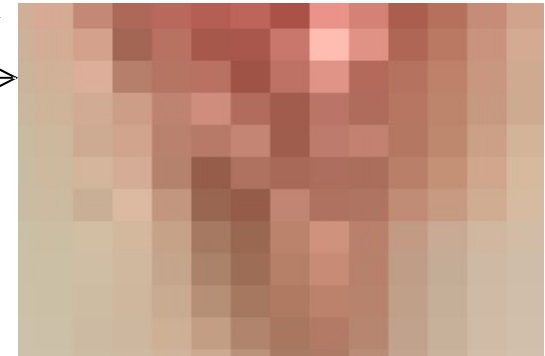
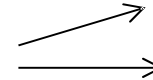
Minden kép elemekből (pixelek) áll.



oszlopok

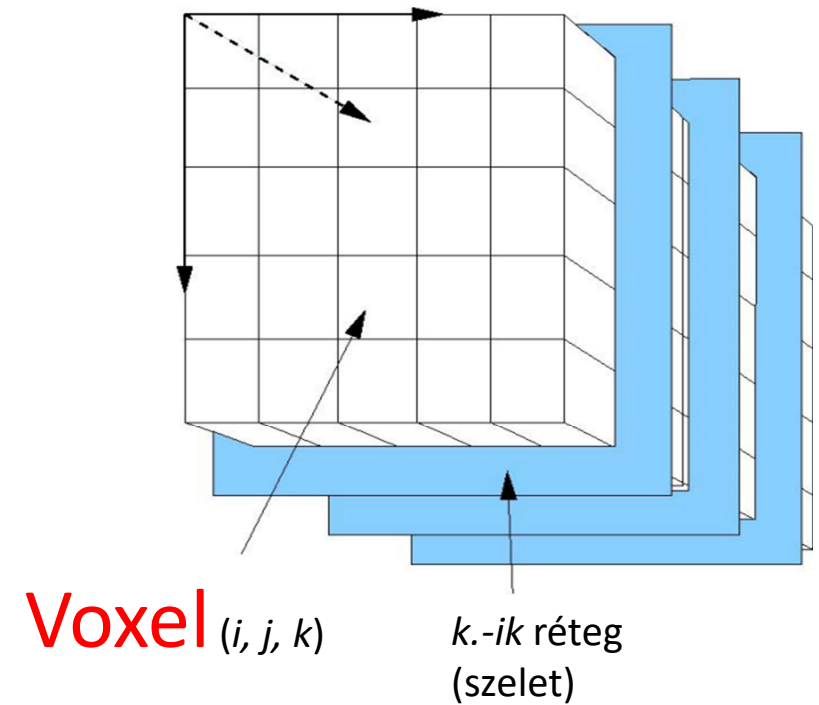


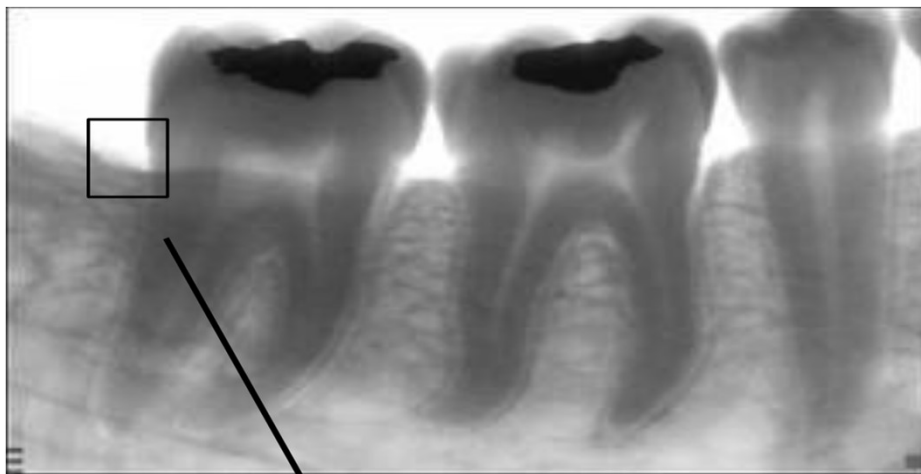
sorok



Pixel (i, j)

3D rekonstrukcióhoz több „lapos” 2D képet készítünk, majd azokat rétegenként egymásra helyezzük.
Így minden Pixel-hez tartozik egy rétegvastagság, tehát a síkbeli négyzet helyett elemi kis kockákból fog állni a **rekonstrukciós térfogat**.



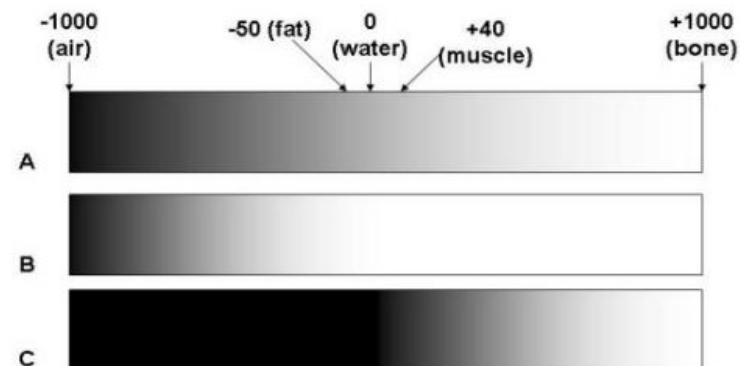


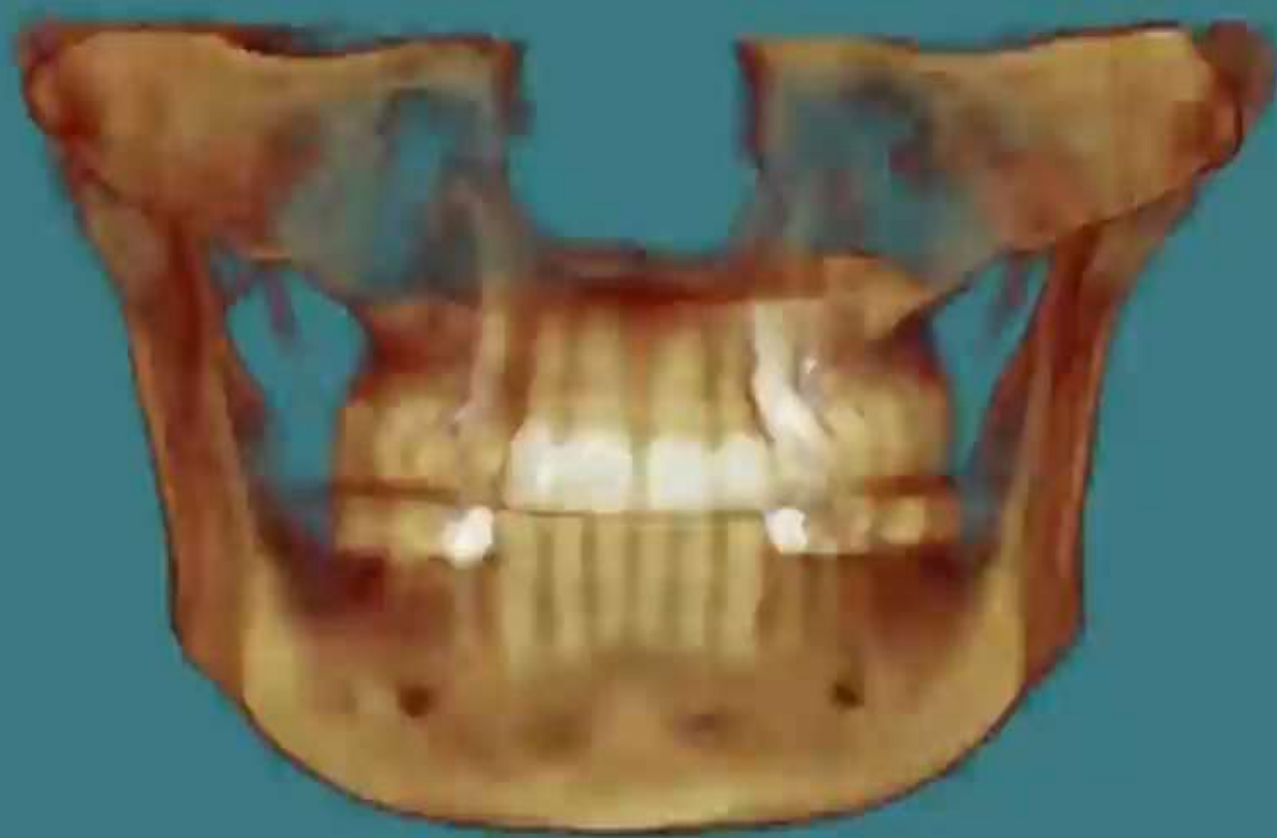
Ablakolás:

A teljes érték-tartomány helyett a képernyőn csak egy részt jelenítünk meg.

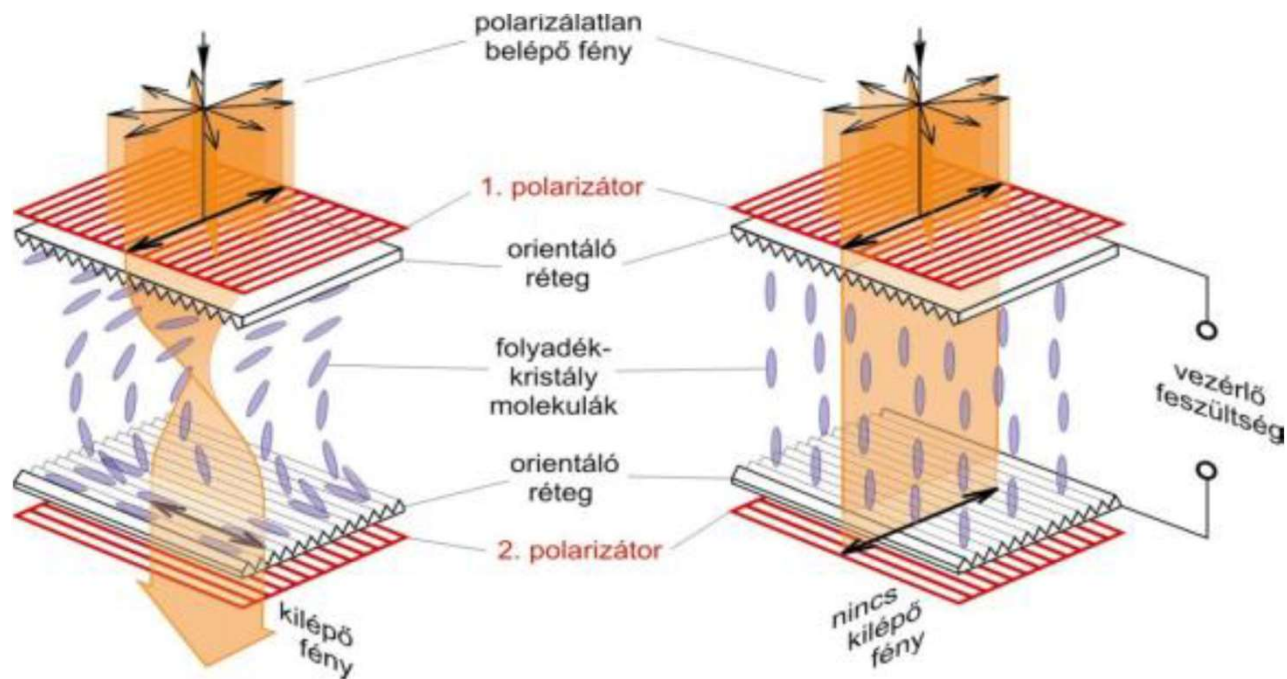
Az emberi szem egy monitoron csak korlátozott számú szín-fényesség között tud különbséget tenni.

CT ablakolási példák.



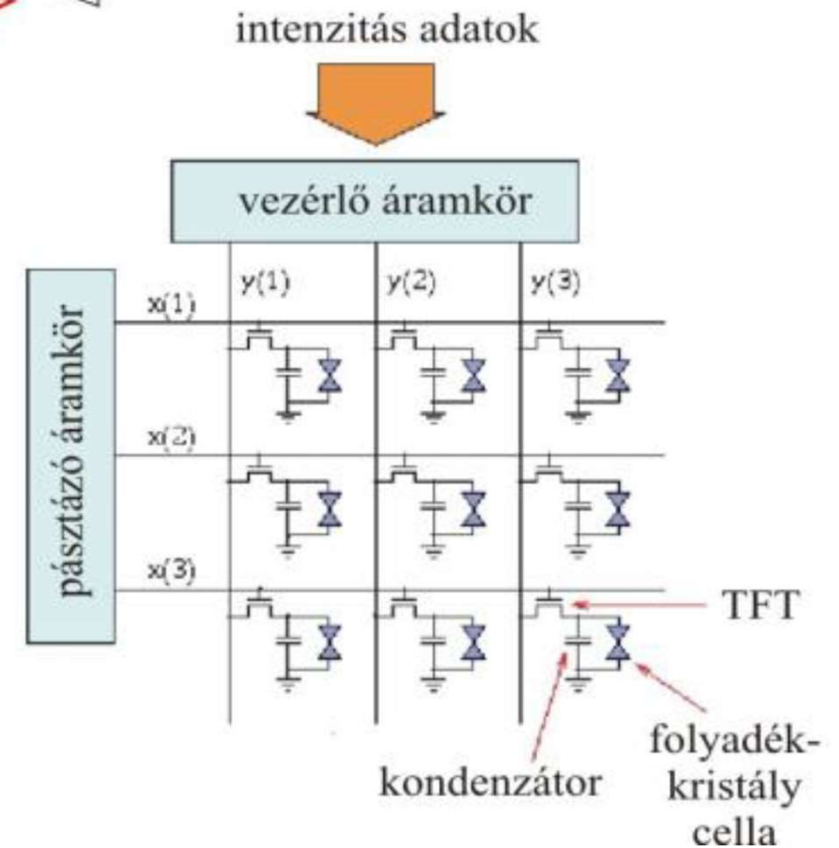


Liquid Crystal Display : Folyadékkristályos kijelző

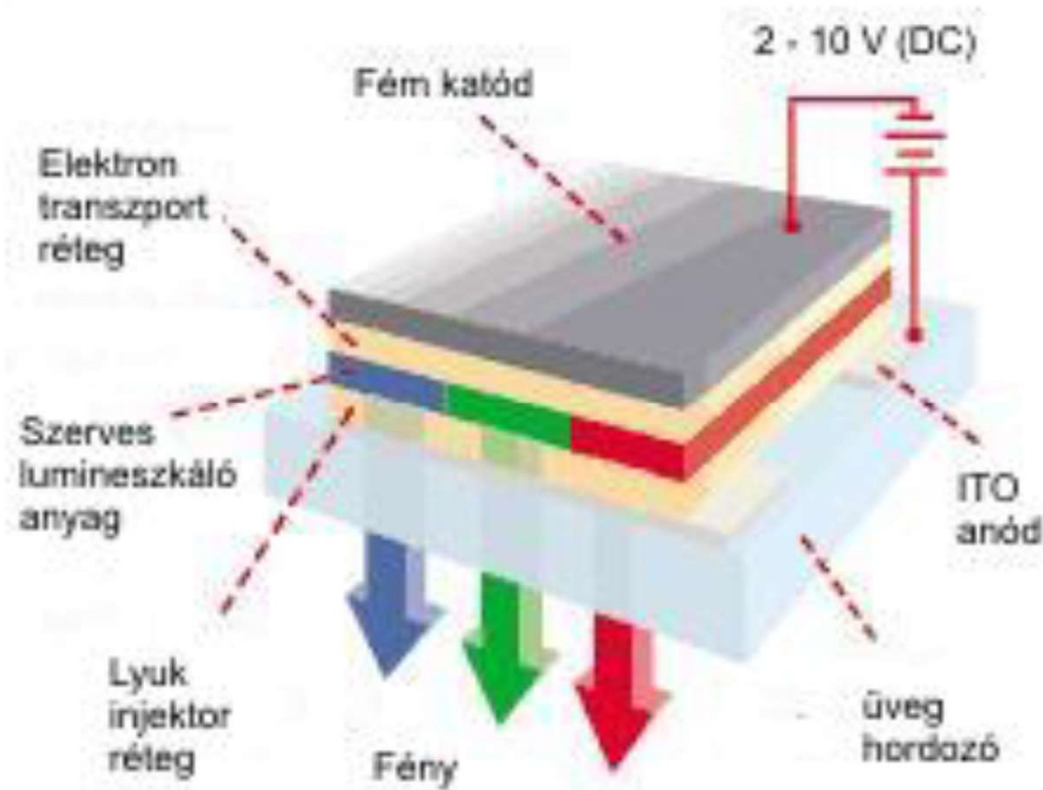


Thin Film Transistor kijelző

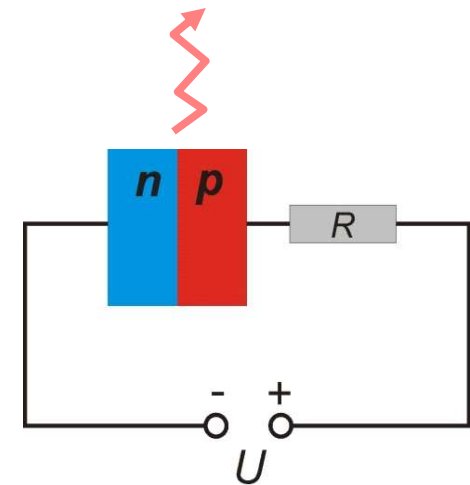
Egy nagyon vékony tranzisztor-réteg vezérel minden pixelt



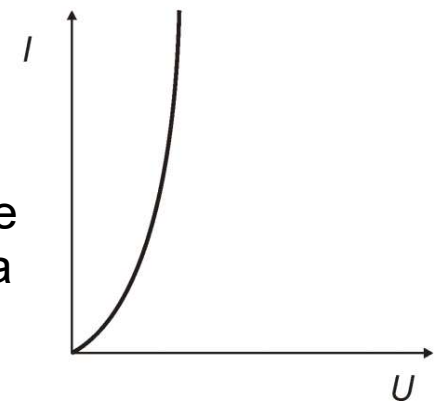
O(rganic)*LED*



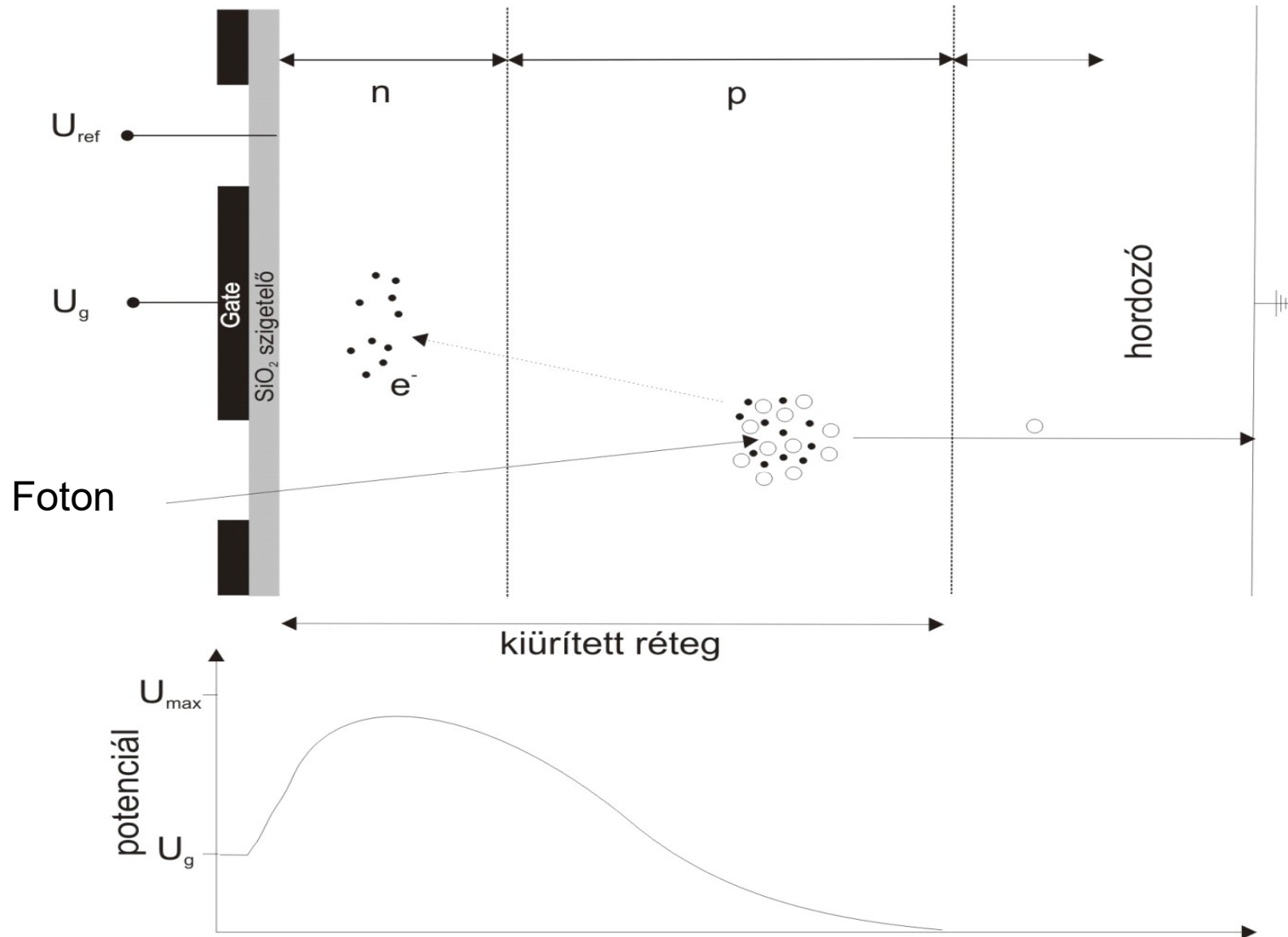
1 pixel szerkezete



Light Emitting Diode
fénykibocsátó dióda



Charge Coupled Device (CCD)



Rtg-kamerákban is fel lehet használni a CCD detektorokat

Jelfeldolgozás

Jelek fajtái

Elektromos jelek feldolgozása,
Fourier-transzformáció

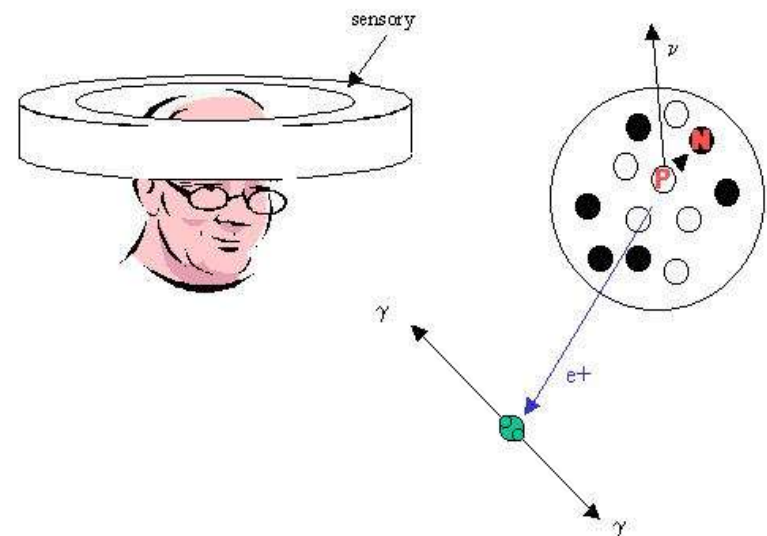
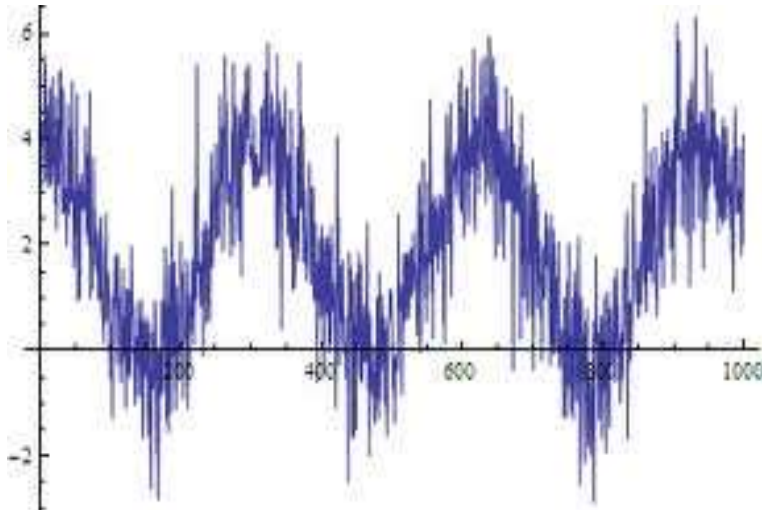
Digital signal processing (DSP): Digitális jelfeldolgozás

Jelek fajtái

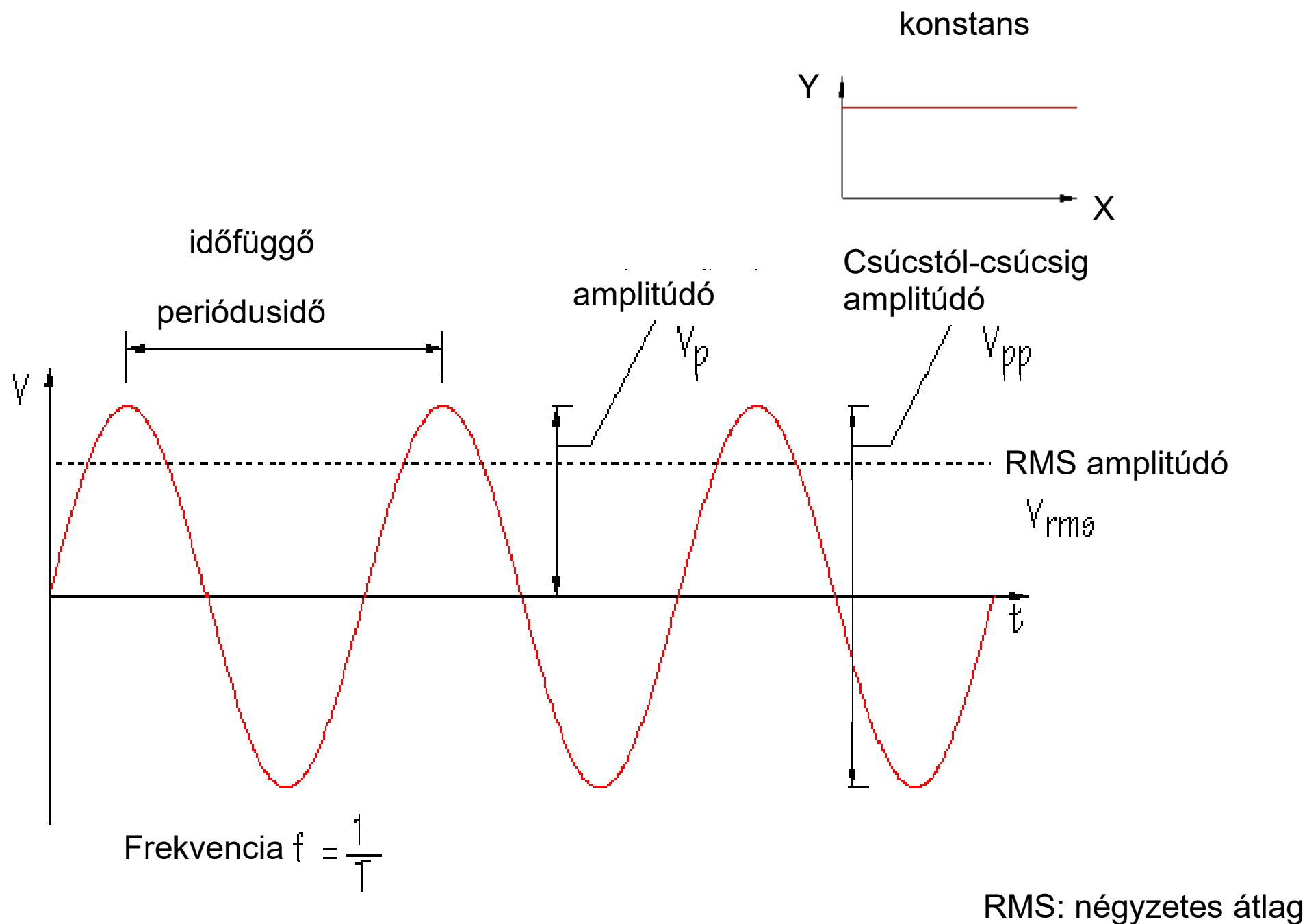
elektromos



Nem elektromos

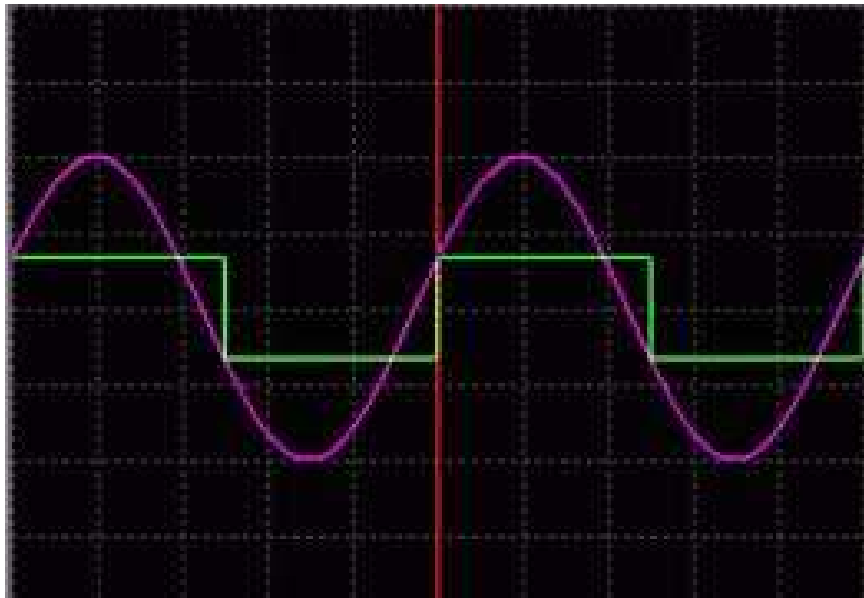


Jelek fajtái

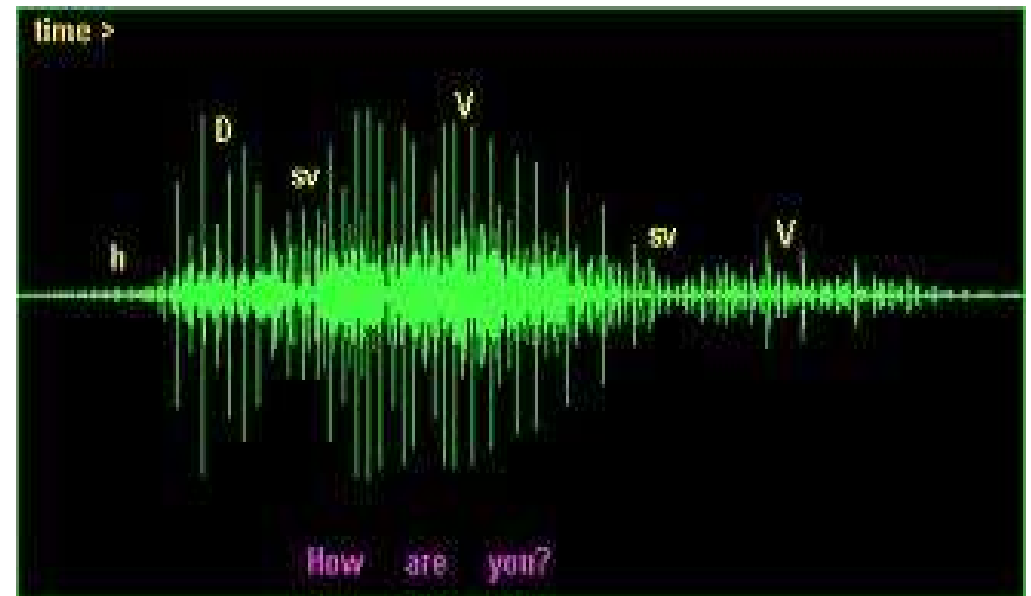


Jelek fajtái

periodikus

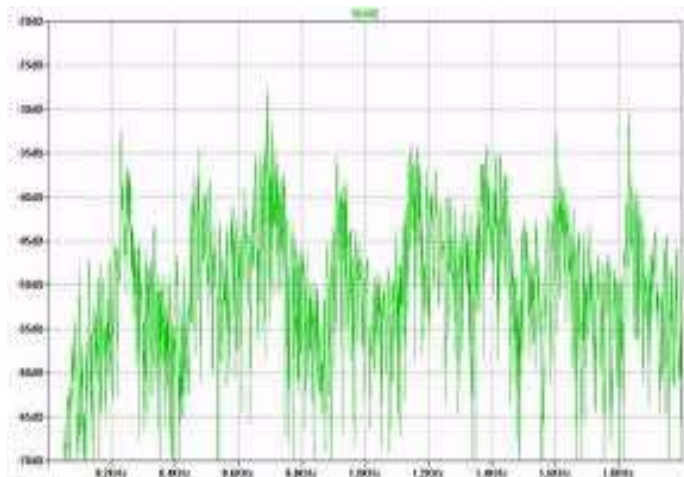


aperiodikus



Jelek fajtái

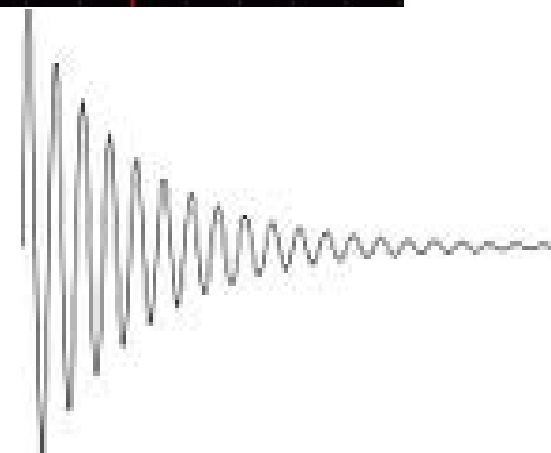
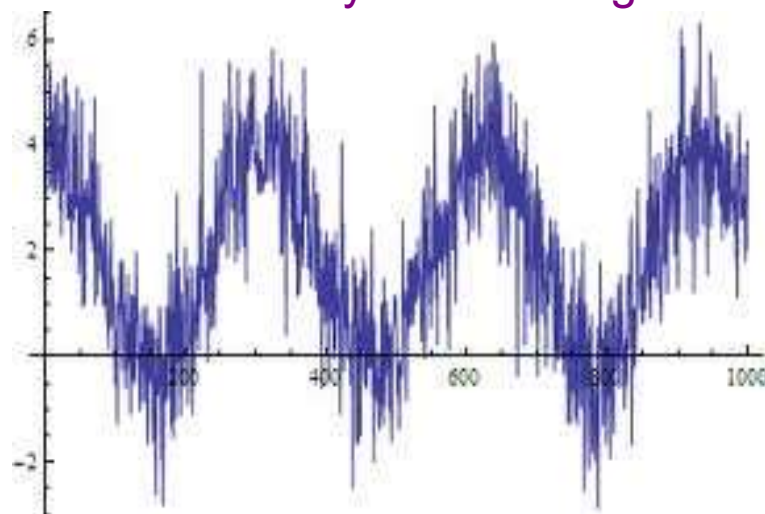
véletlenszerű



determinisztikus

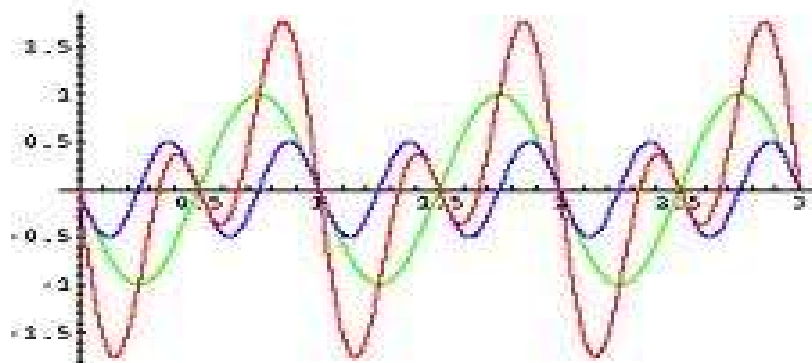


Többszörre a valóságban keverék.

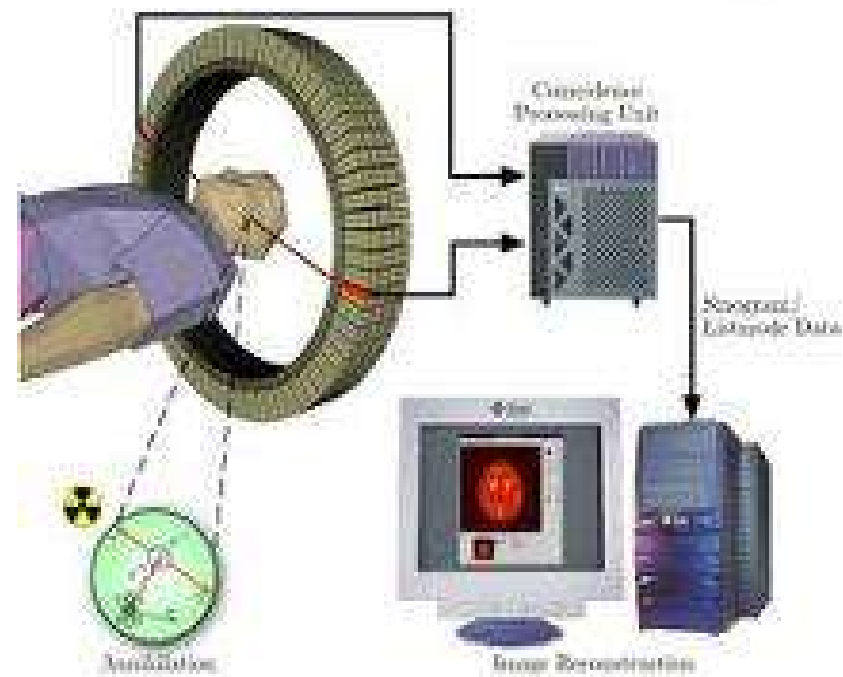
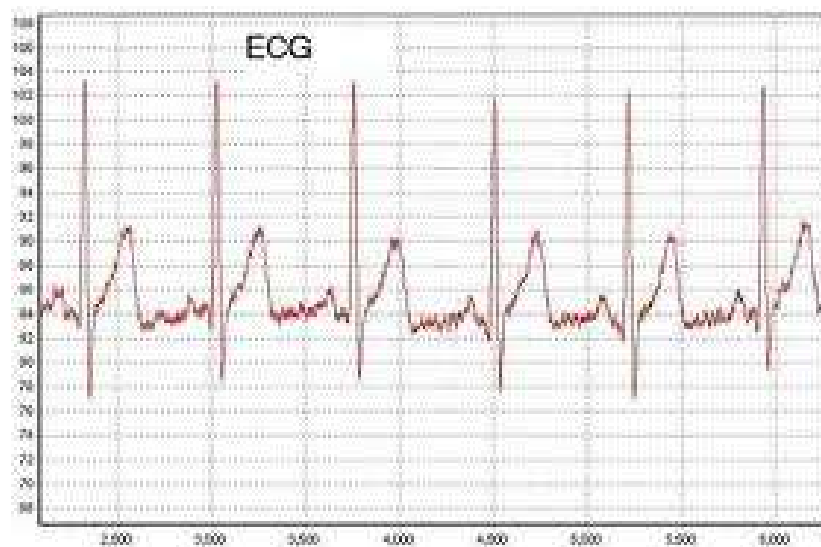
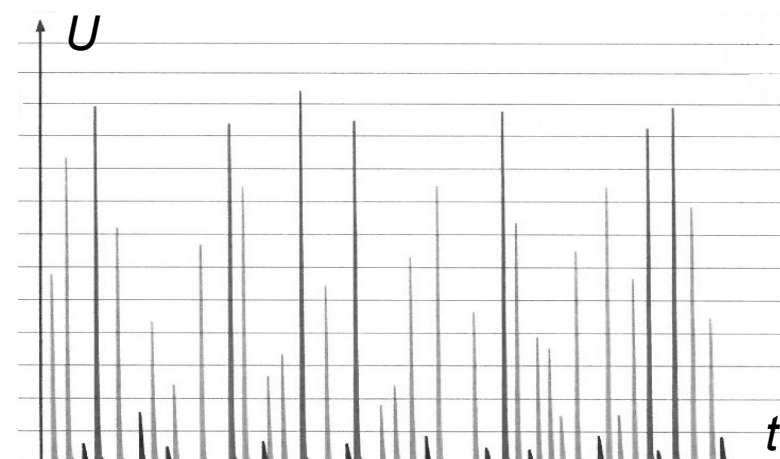


Jelek fajtái

folytonos

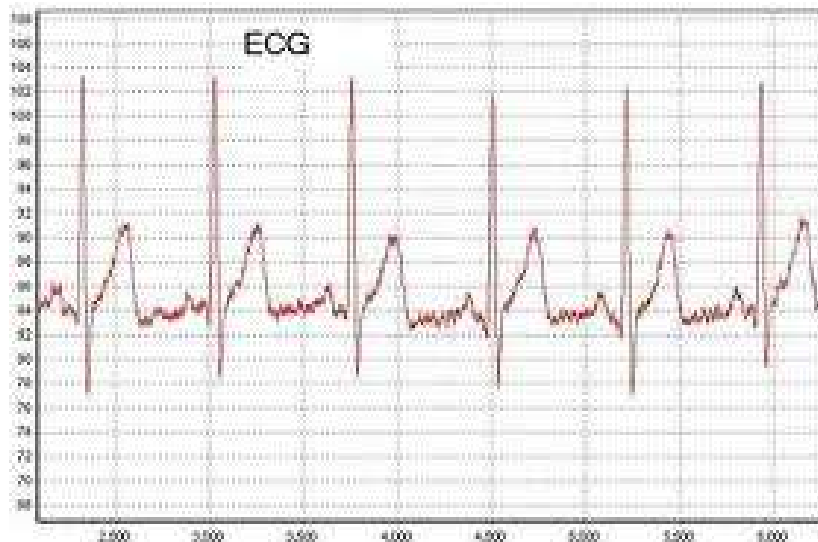


Impulzus-jellegű



Jelek fajtái

analóg

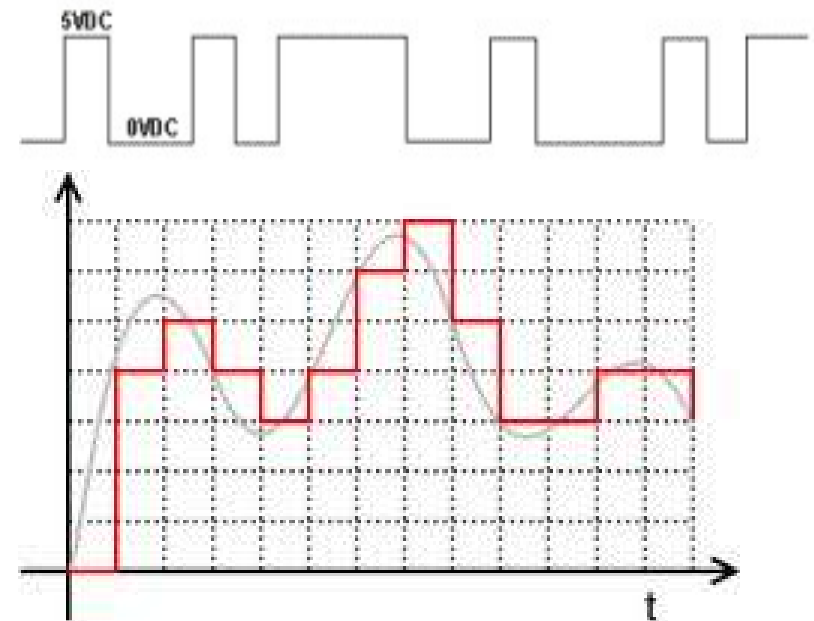


Elvben korlátlan felbontású

digitális

1 0 0 1 0 1 1 1 0 0 1 0 0 0 1 0 1

Unipolar Coding ("1" = +V , "0" = 0V)



Digitális: számsor
Véges felbontás

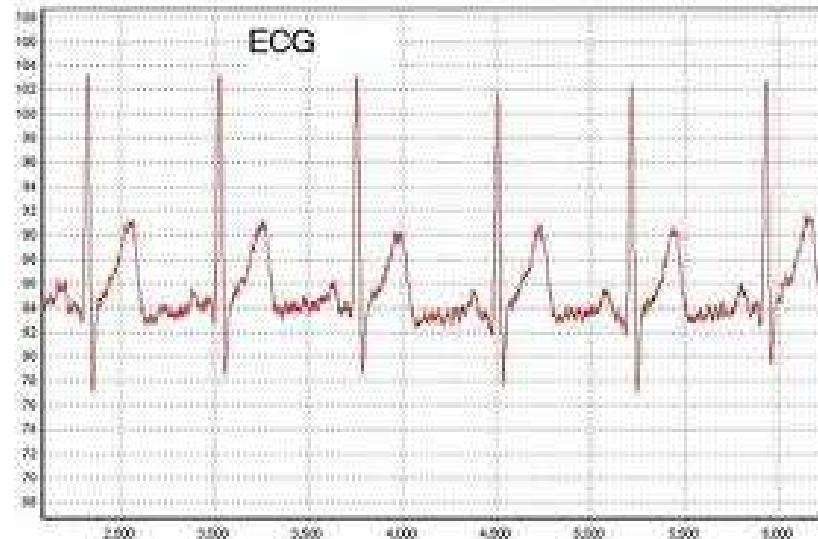
A digitális jel egyfajta
kódolás : az elektromos jelet
számokká alakítjuk

Jelek információtartalma

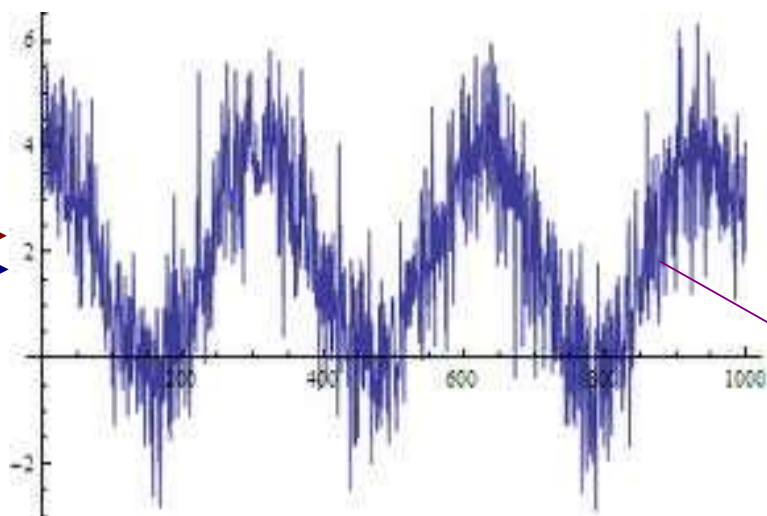
Valóban korlátlan felbontású az analóg jel?

Tényleg kell a **korlátlan** felbontás?

egyáltalán **van** korlátlan felbontású valódi analóg jel?



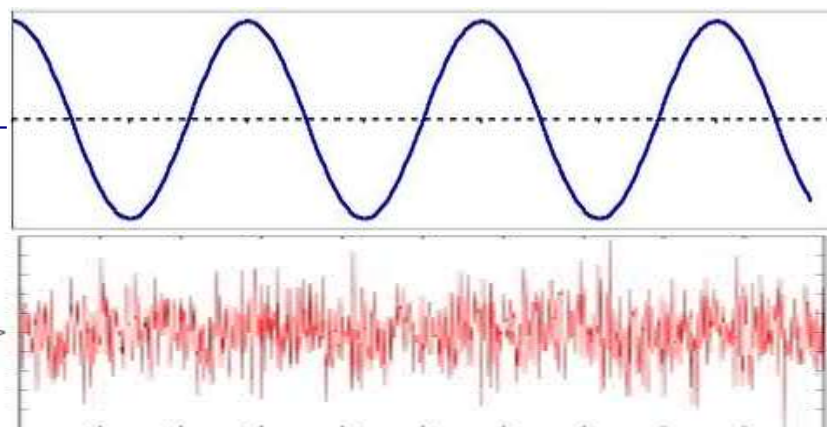
*A korlátlan felbontás
csak elvi lehetőség
(időben és értékben)*



NEM!

Valós helyzetben mindig keverékünk van:

$S = \text{információ (hasznos jel)} + \text{zaj}$

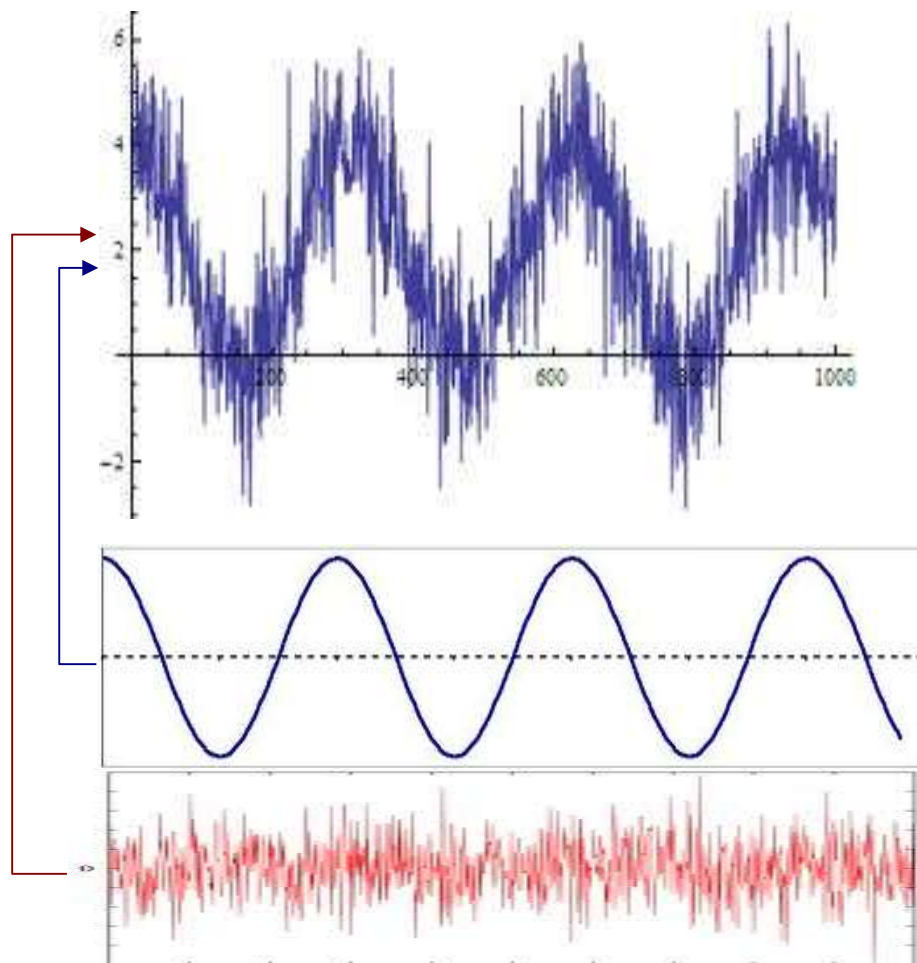


Hasznos jel

+

zaj

Jelek információtartalma



A cél az információ megőrzése, továbbítása
(másolása, tárolása, felhasználása)
Lehetőleg zaj nélkül.

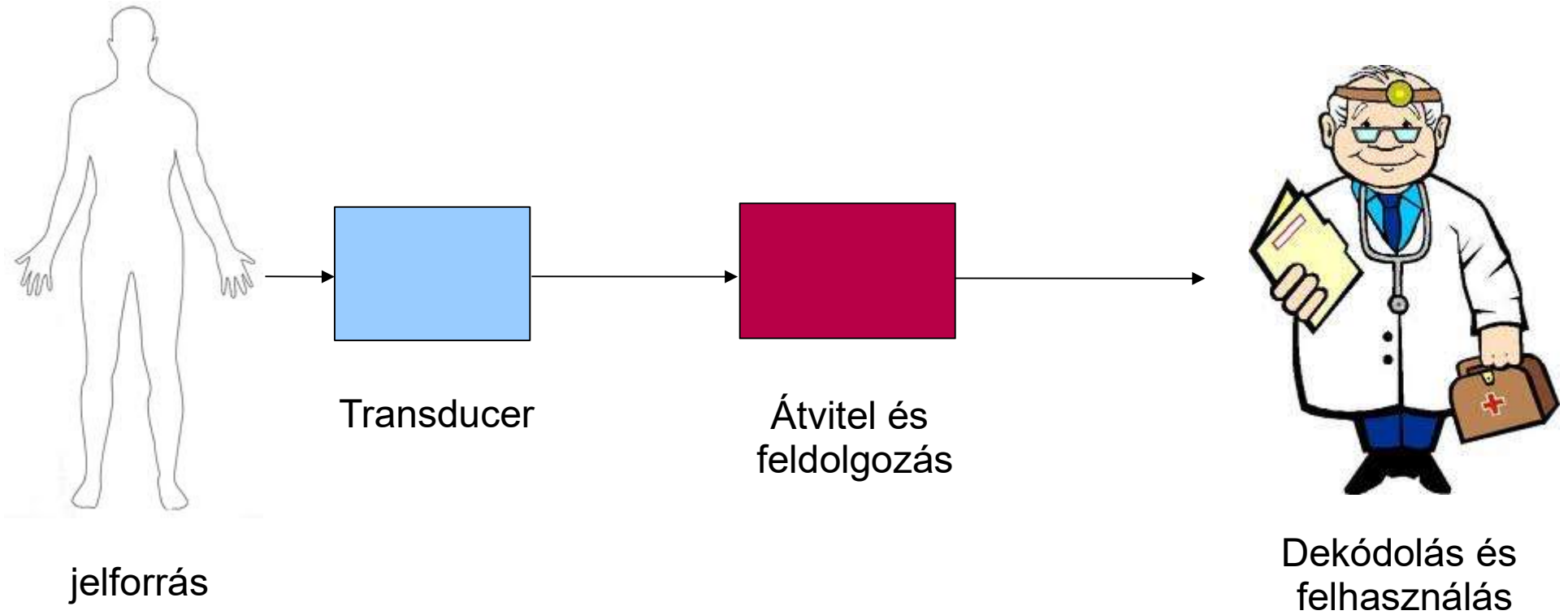
Hasznos jel $U = A_{\text{inf}} \cdot \cos(\omega t + \phi)$

+

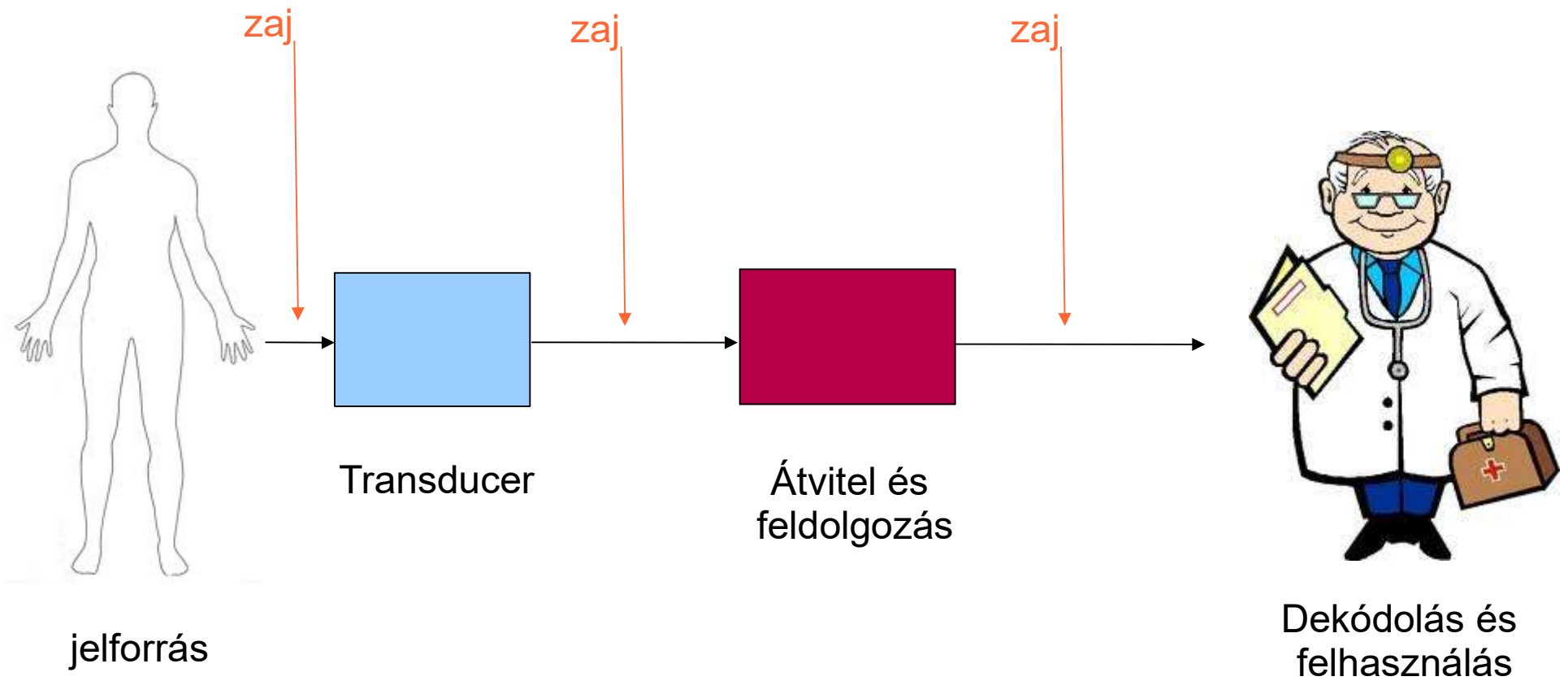
zaj

$$\text{Noise}(t) = A_{\text{noise}} \cdot \text{Random}(t)$$

Jelek továbbítása és feldolgozása

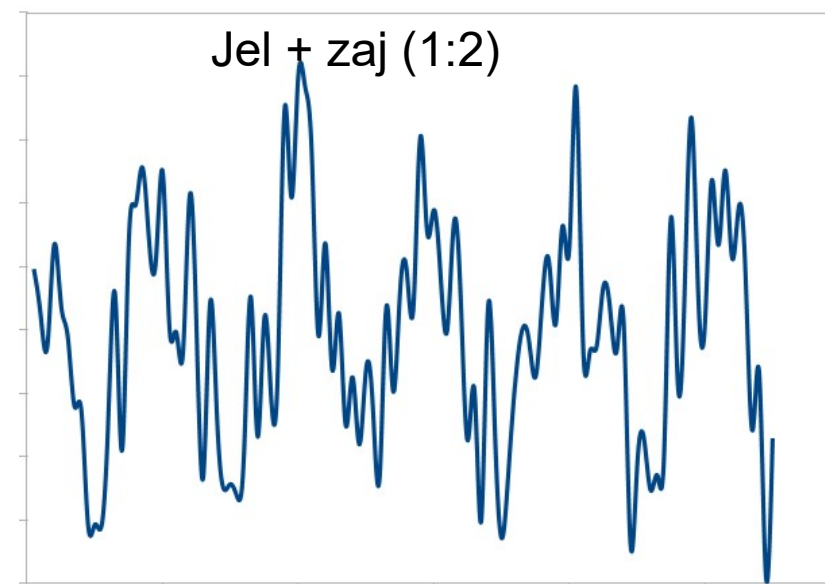
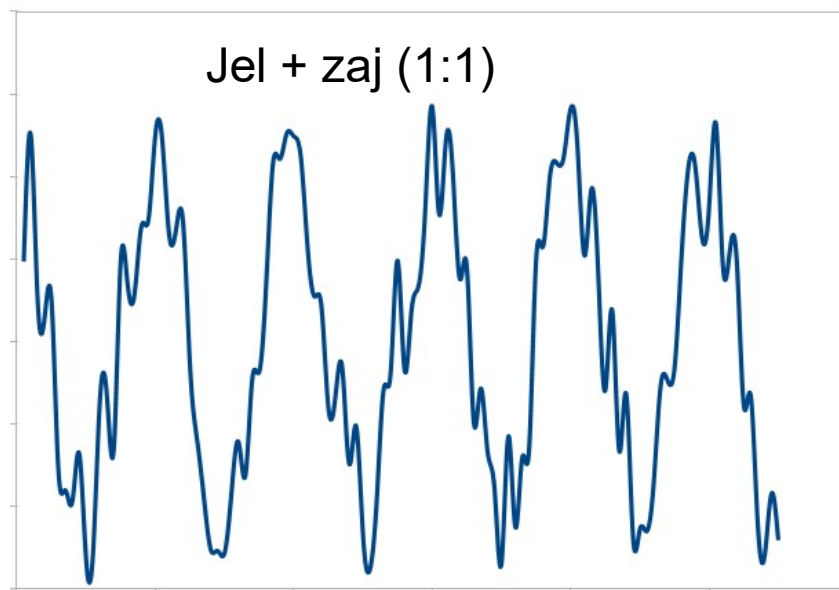
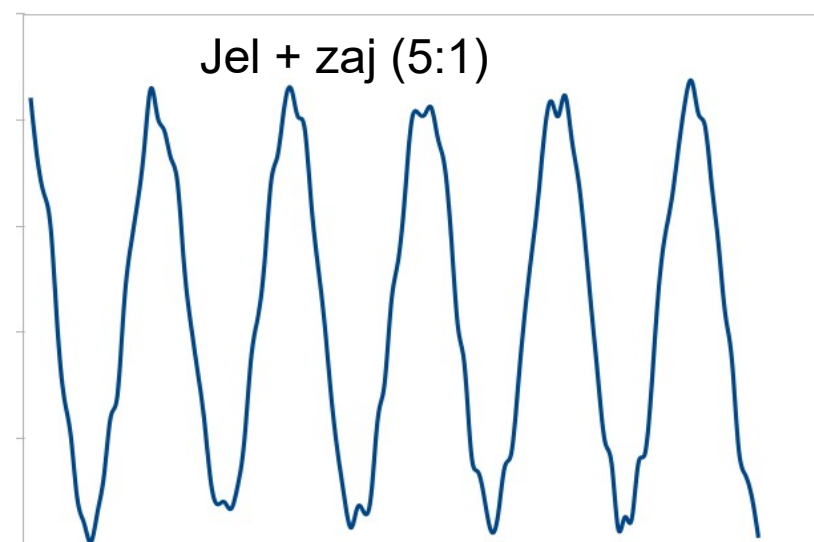
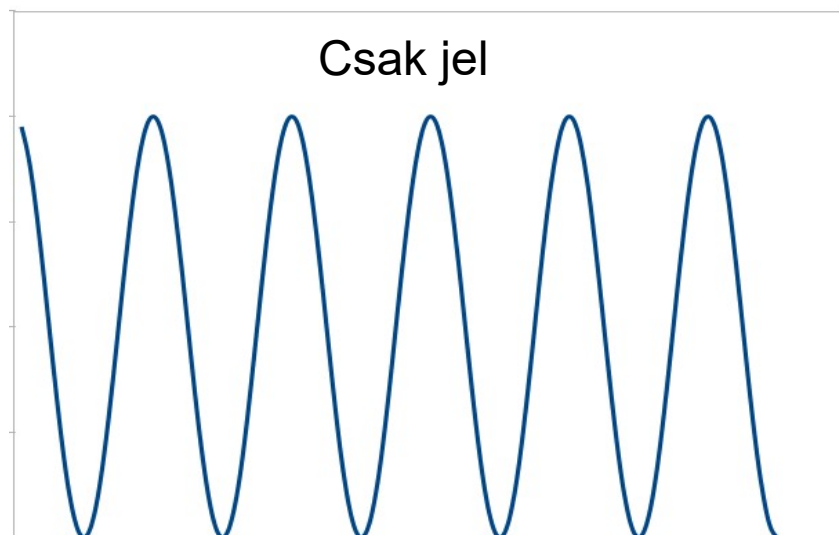


Jelek továbbítása és feldolgozása



A zajtól meg akarunk szabadulni!

Jelek továbbítása és feldolgozása



Jelek továbbítása és feldolgozása

Erősítő

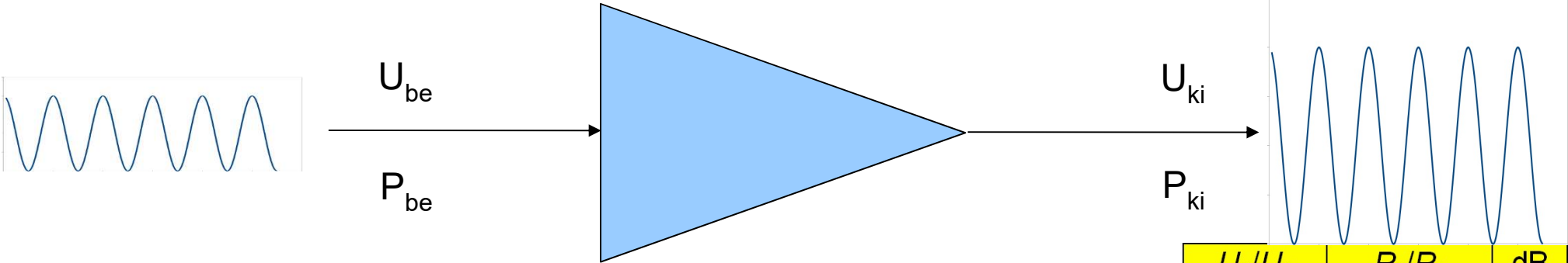
Feladata: a jel felerősítése. (magnövelése)

Gyakran egyben a zaj elleni védekezés első lépése is itt kezdődik.

A módszer minden
jeltovábbító eszközre
alkalmazható

Erősítők vizsgálata

Alap-analízis: erősítés-szint



$P = U \cdot I$

$n = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{ki}}{P_{be}} \right) \text{ [dB]}$

| U_2/U_1 | P_2/P_1 | dB |
|----------------------|-----------------------|----|
| 1,414 | 2 | 3 |
| 2 | 4 | 6 |
| | 8 | 9 |
| 3,16 | 10 | 10 |
| | 20 | 13 |
| 10 | 100 | 20 |
| | 1000=10 ³ | 30 |
| 100=10 ² | 10000=10 ⁴ | 40 |
| 1000=10 ³ | 10 ⁶ | 60 |

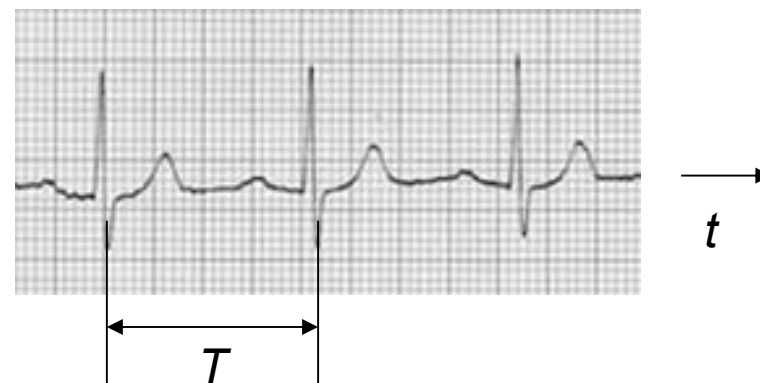
$\frac{P_2}{P_1} = 10 \Leftrightarrow 10 \cdot \lg 10 \text{ dB} =$
 $= 10 \cdot 1 \text{ dB} = 10 \text{ dB}$

$\frac{P_2}{P_1} = 2 \Leftrightarrow 10 \lg 2 \text{ dB} =$
 $= 10 \cdot 0,3 \text{ dB} = 3 \text{ dB}$

Erősítők vizsgálata

Fourier tétel: minden (periódikus) jel felbontható sin és cos függvények összegére, melyekből a jel később újra előállítható. A felbontásban a frekvencia és amplitúdó értékeket keressük.

$$\text{Signal}(t) \longleftrightarrow \sum_i A_i \cdot \sin(\omega_i t) + B_i \cos(\omega_i t)$$

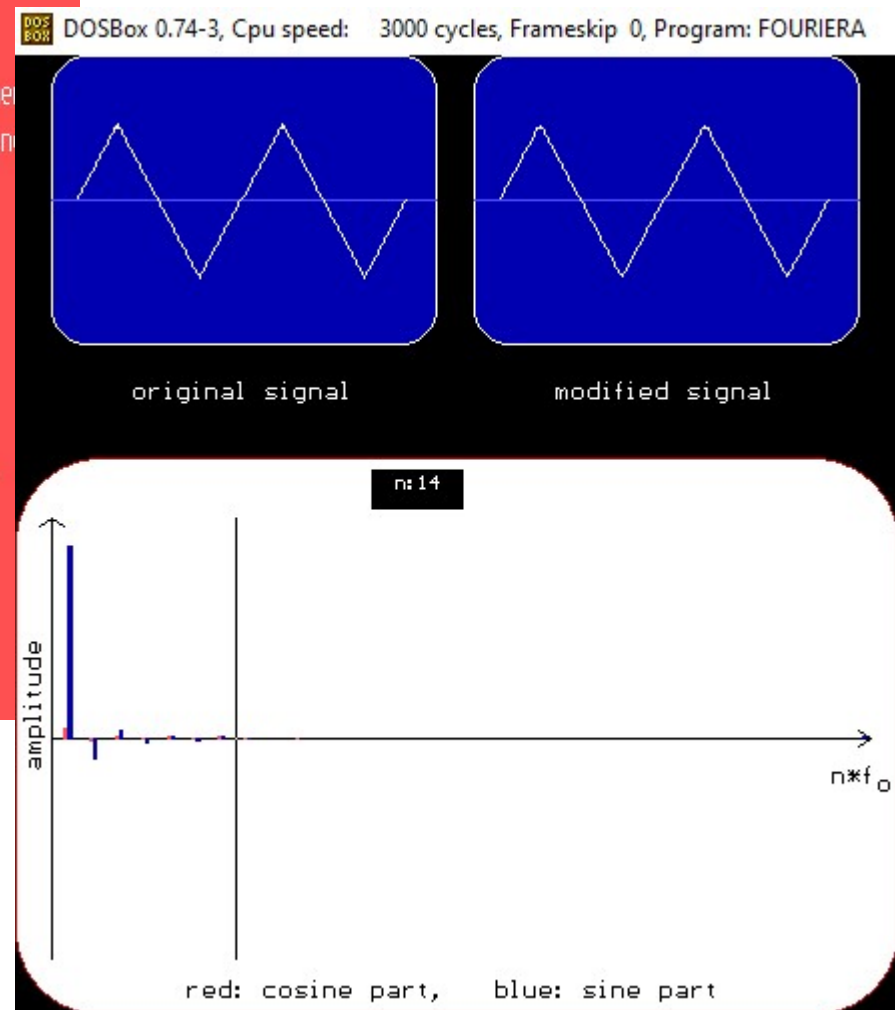
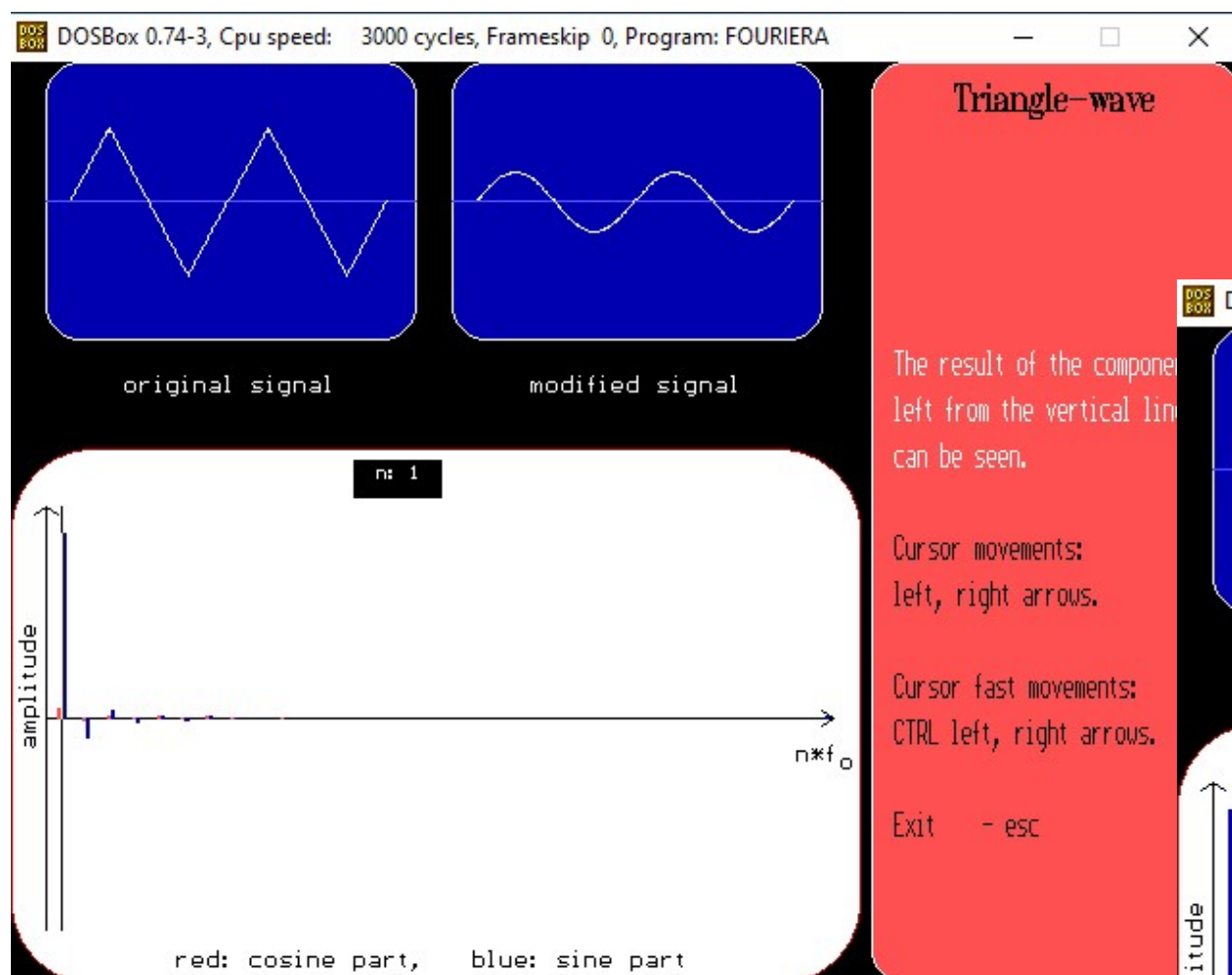


Periodikus jelek esetében $\omega_i = k \cdot f$, $f = 1/T$ és $k = 1, 2, 3, 4, 5, \dots$

alapharmonikus felharmonikusok

Erősítők vizsgálata

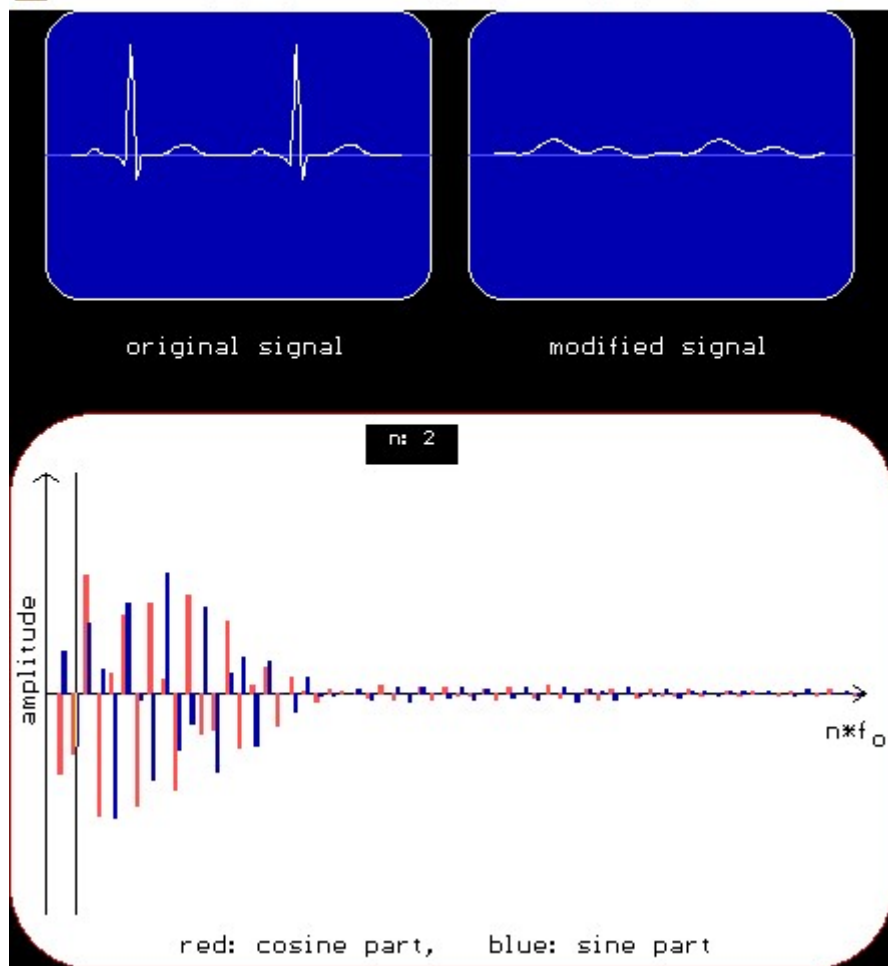
$$\text{Signal}(t) \leftrightarrow \sum_i A_i \cdot \sin(\omega_i t) + B_i \cos(\omega_i t)$$



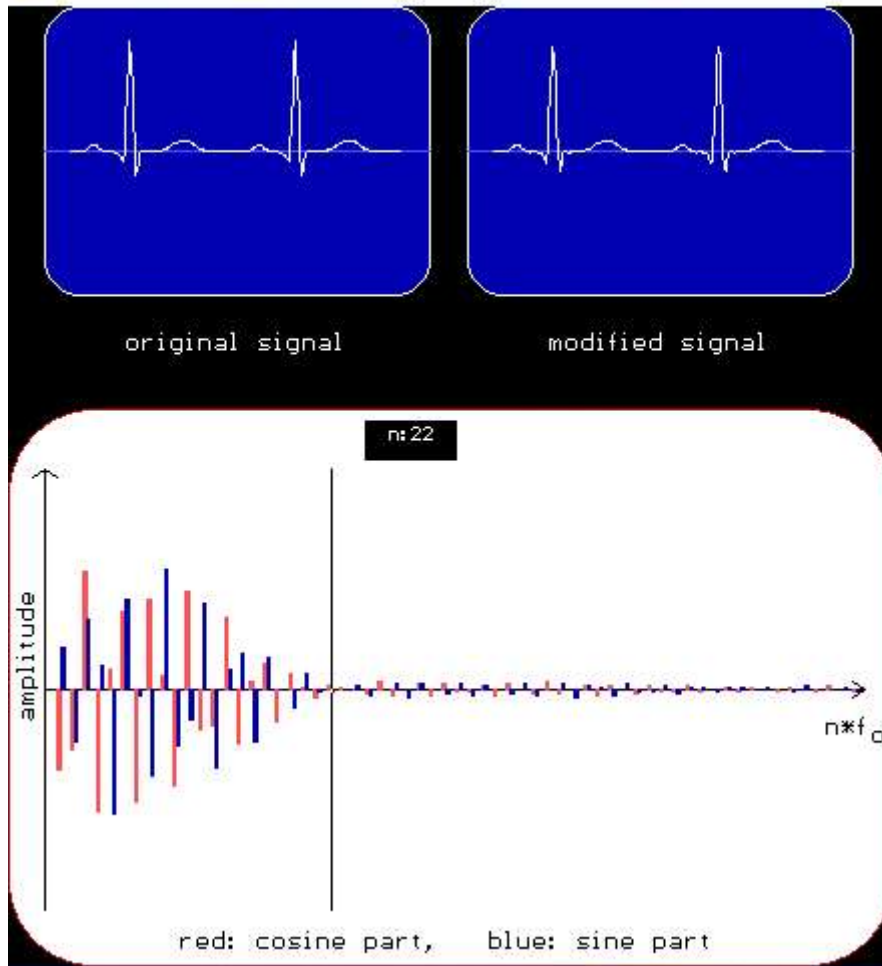
Erősítők vizsgálata

$$\text{Signal}(t) \leftrightarrow \sum_i A_i \cdot \sin(\omega_i t) + B_i \cos(\omega_i t)$$

DOSBox 0.74-3, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Program: FOURIERA



DOSBox 0.74-3, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Program: FOURIERA

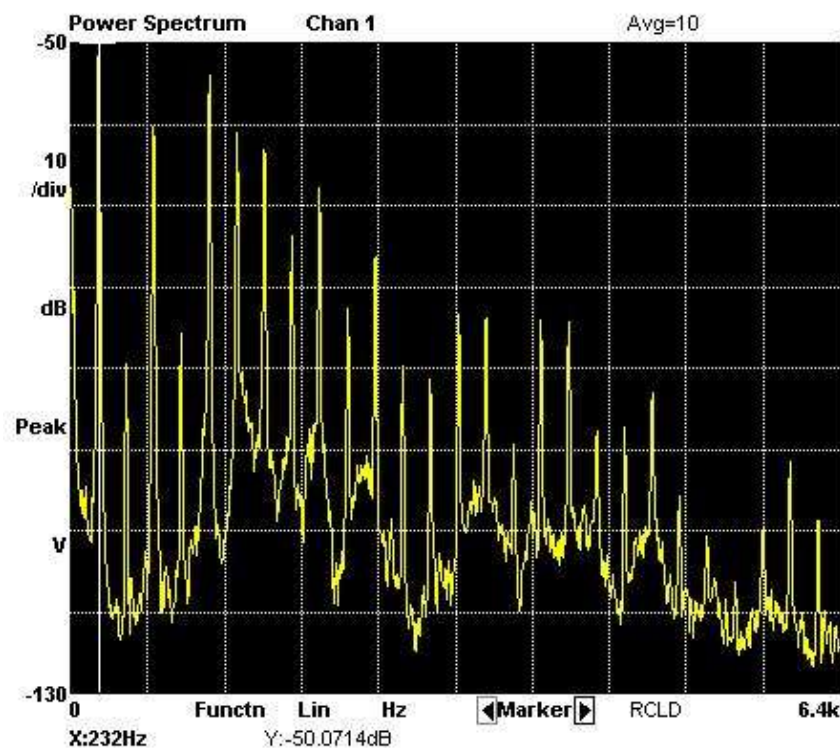
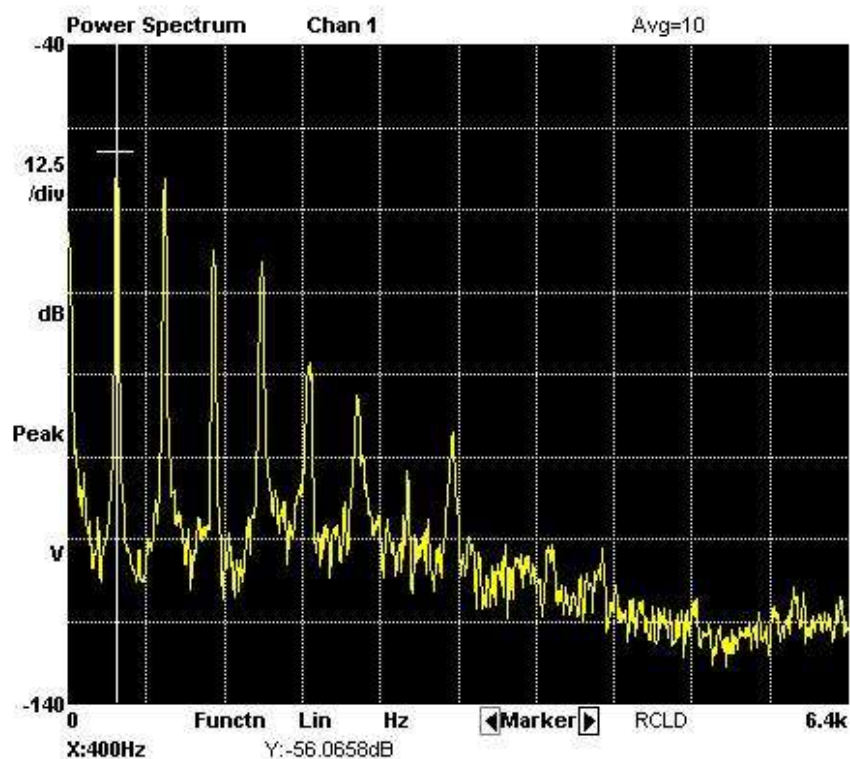


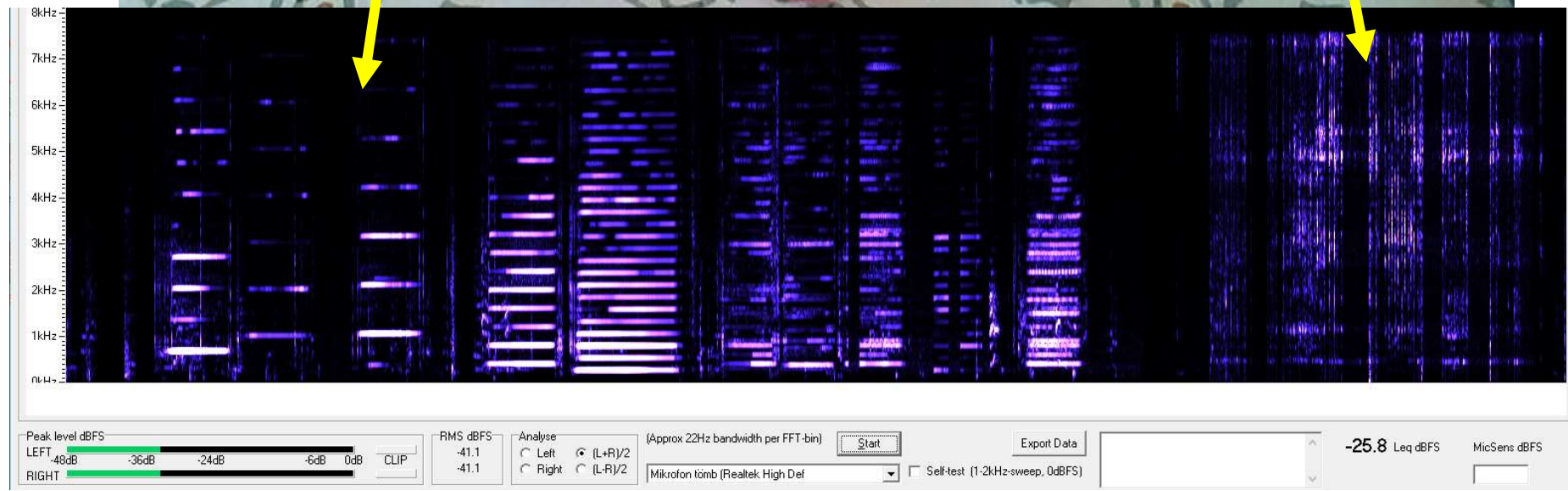
Erősítők vizsgálata

Nem-periodikus jelek esetében:
Fourier.transzformáció (folytonos spektrum)

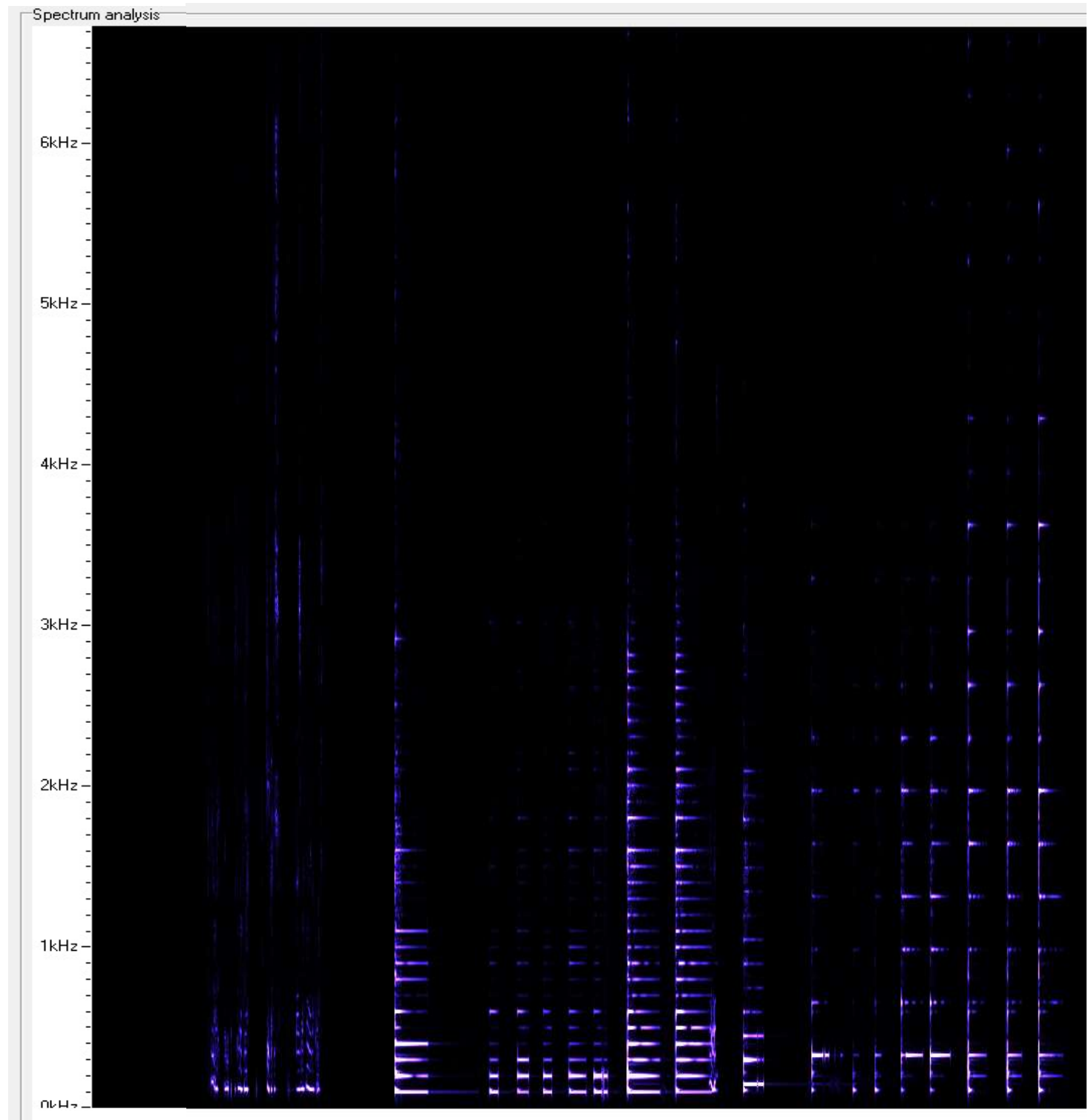
$$\text{Signal}(t) \leftrightarrow \sum_i A_i \cdot \sin(\omega_i t) + B_i \cos(\omega_i t)$$

$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{i\omega t} dt$$





Frekvencia-analízis:
A jel spektrumát adott
tartományban
rögzítjük



Erősítők vizsgálata

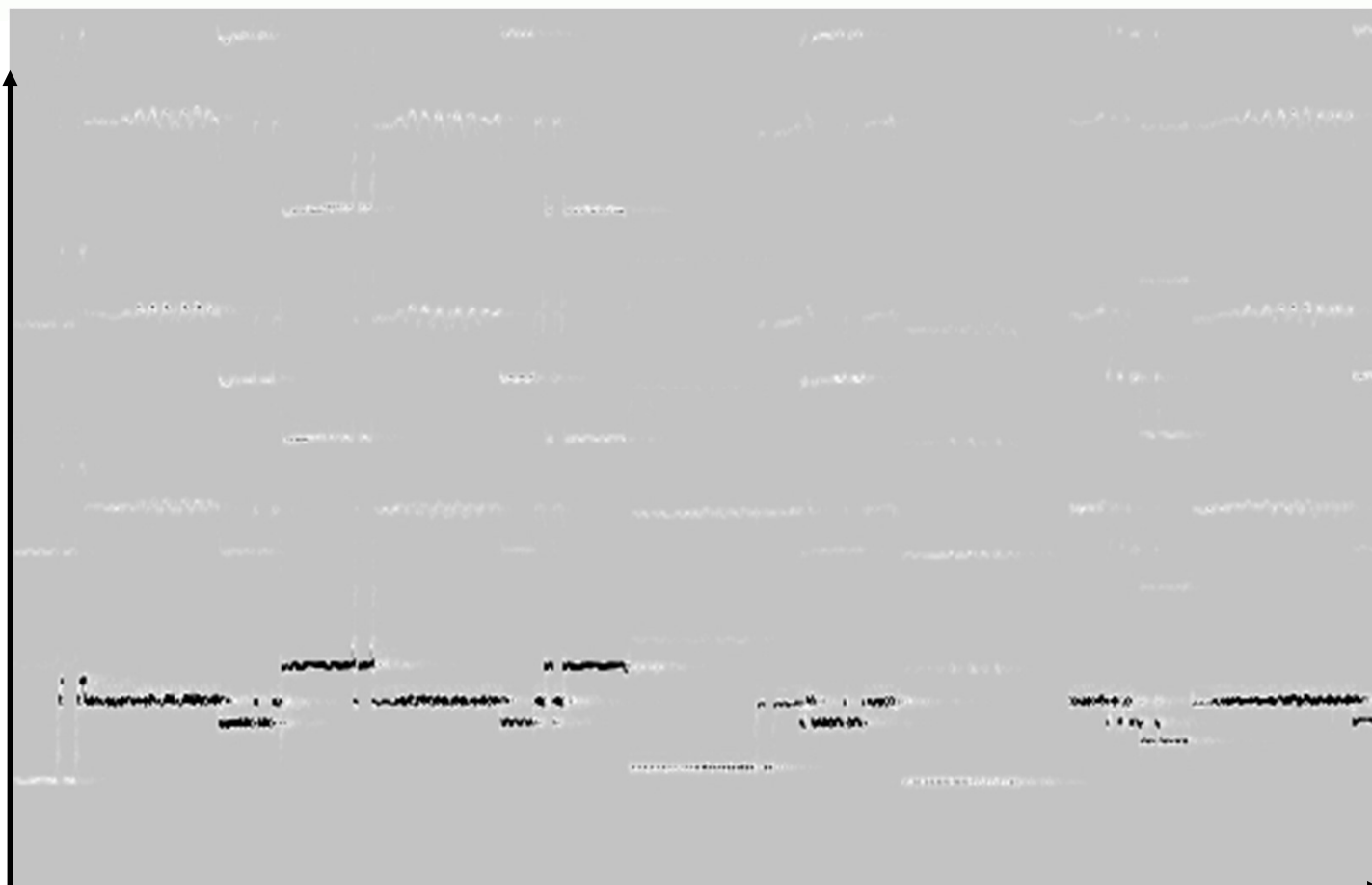
$$\text{Signal}(t) \leftrightarrow \sum_i A_i \cdot \sin(\omega_i t) + B_i \cos(\omega_i t)$$

$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{i\omega t} dt$$



f

„Voiceprint”:
Időfüggő
fourier-
analízis,
Automata
kottázáshoz is
használható



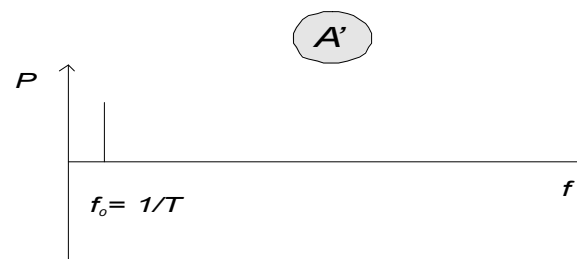
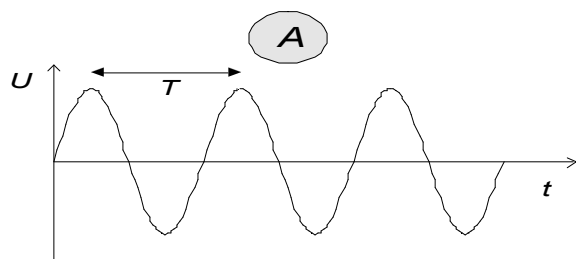
t

Erősítők vizsgálata

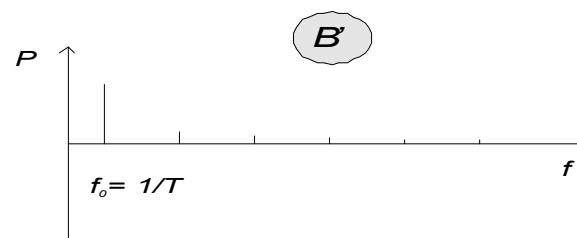
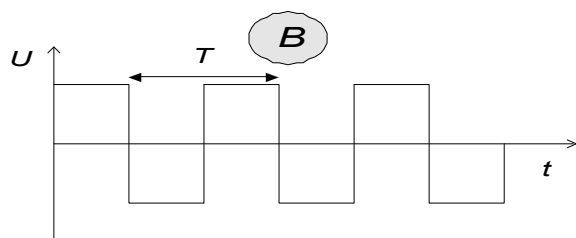
Nem periodikus jelek: Fourier transzformáció

$$\text{Signal}(t) \leftrightarrow \sum_i A_i \cdot \sin(\omega_i t) + B_i \cos(\omega_i t)$$

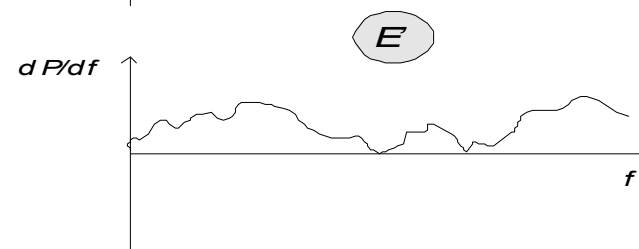
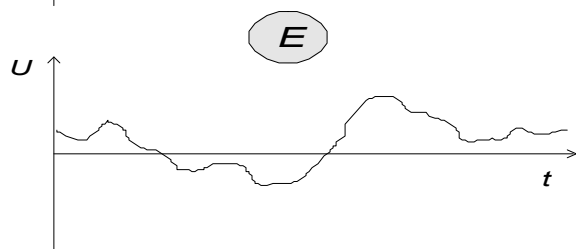
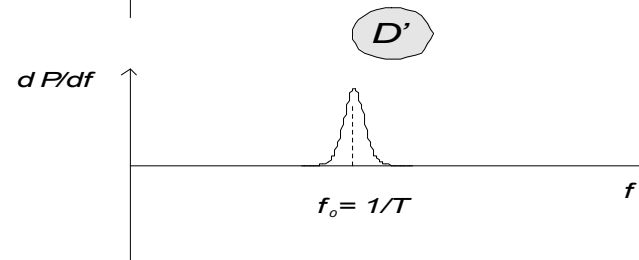
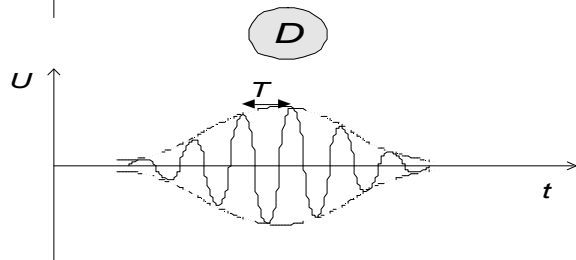
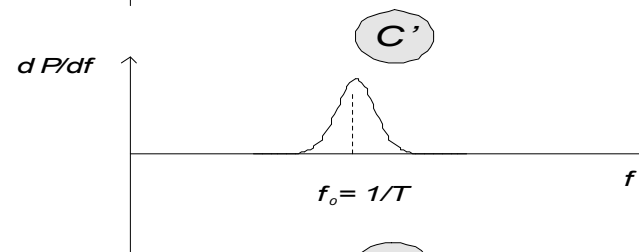
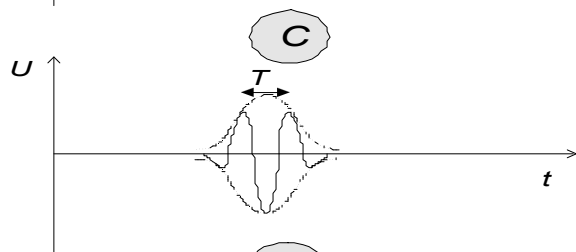
$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{i\omega t} dt$$



Egy tökéletes sin spektruma vonalas



Időfüggő jel



Fourier-spektrum

Rövid sin szakasz spektruma sávos, Az impulzus hosszától függően

Erősítők vizsgálata

$$\text{Signal}(t) \leftrightarrow \sum_i A_i \cdot \sin(\omega_i t) + B_i \cos(\omega_i t)$$

$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{i\omega t} dt$$

Minden jel az információ egyfajta megjelenítése

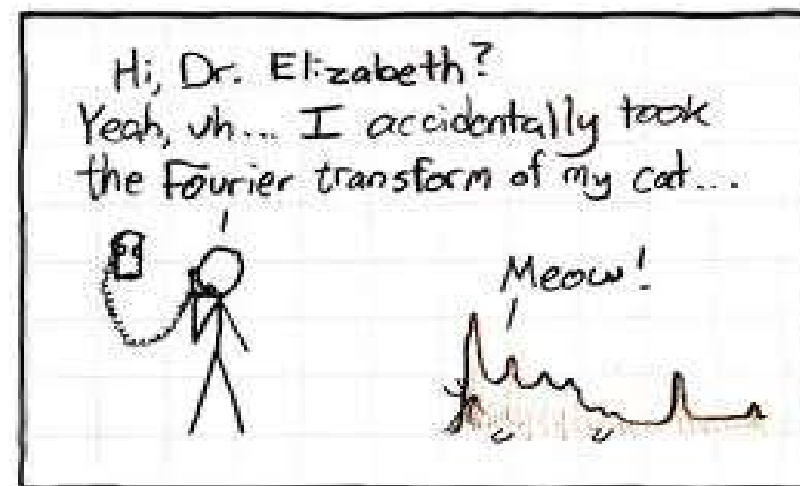
Ugyanazt a jelet megjelölhetjük az idő függvényében,

vagy

a spektrumot ábrázoljuk, a kettő ugyanannak a jelnek a két formája.

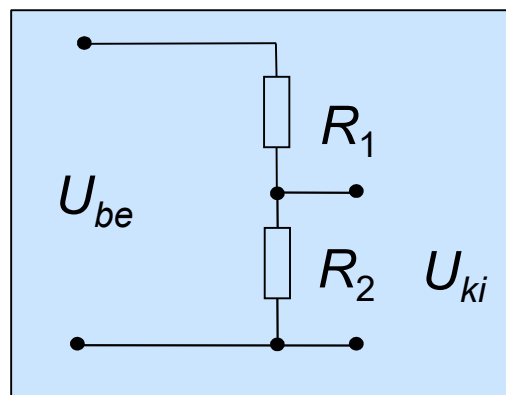
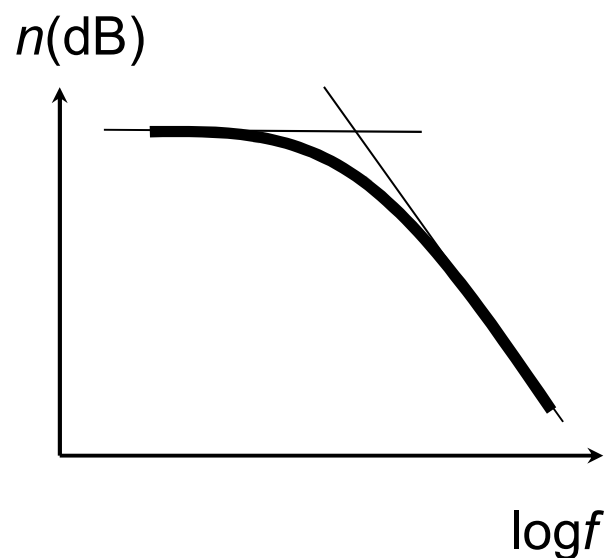
Csak tudni kell „olvasni”

(Picasso: La Crucifixion)



Erősítők vizsgálata - átviteli függvény

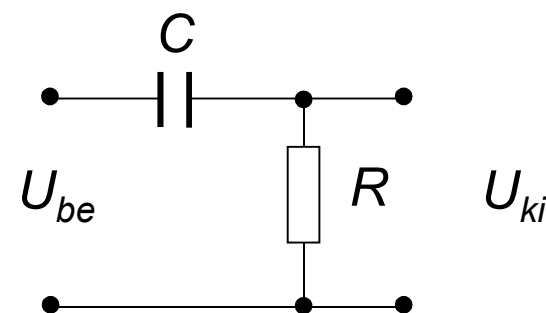
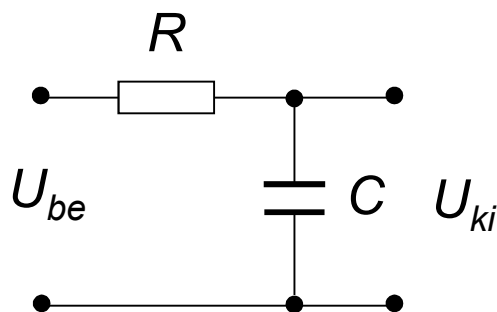
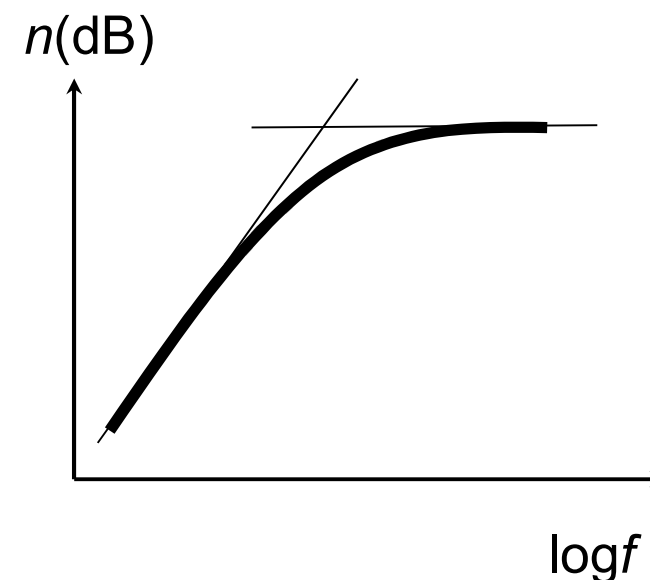
Alul-áteresztő szűrő



$$U_{output} = U_{input} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

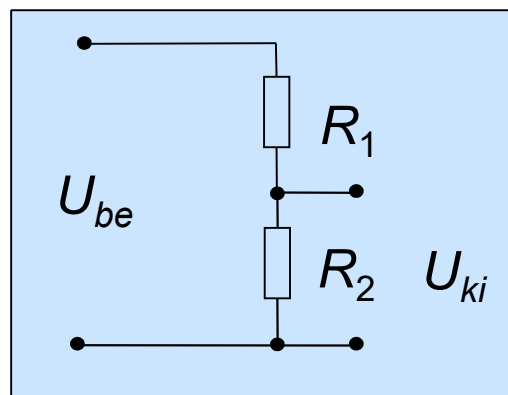
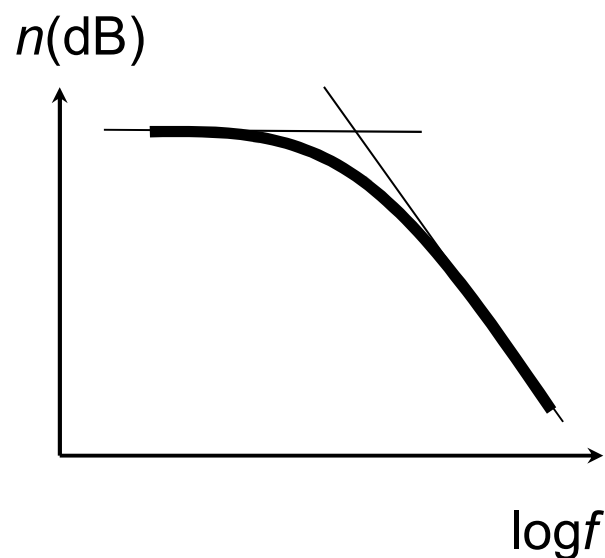
A „sima” feszültségosztóban az egyik R-t C-re cseréljük

Felül-áteresztő szűrő



Erősítők vizsgálata - átviteli függvény

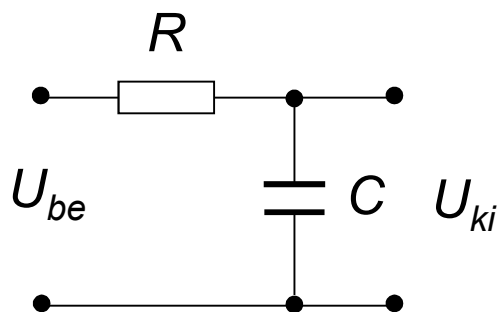
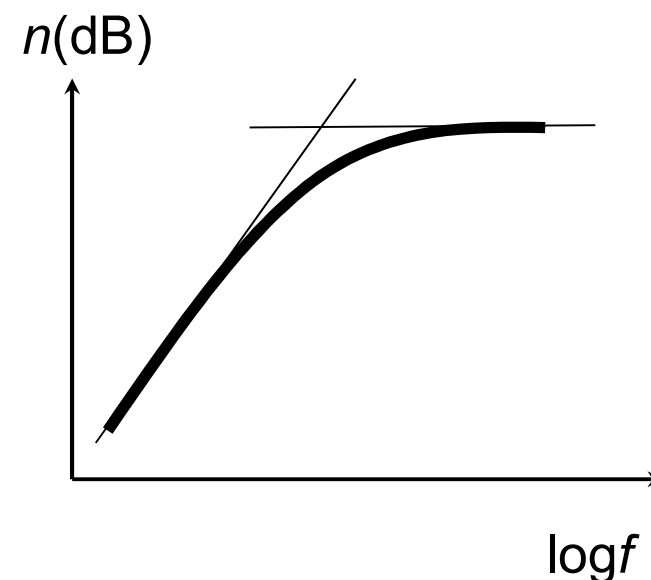
Alul-áteresztő szűrő



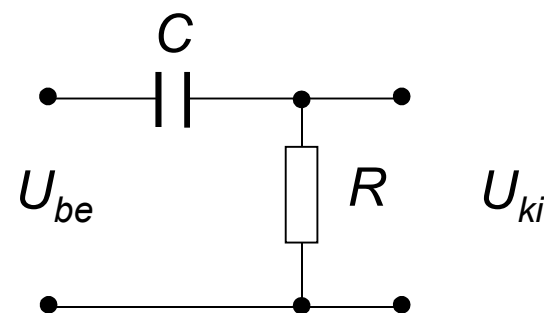
$$U_{output} = U_{input} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

A „sima” feszültségosztóban az egyik R-t C-re cseréljük

Felül-áteresztő szűrő

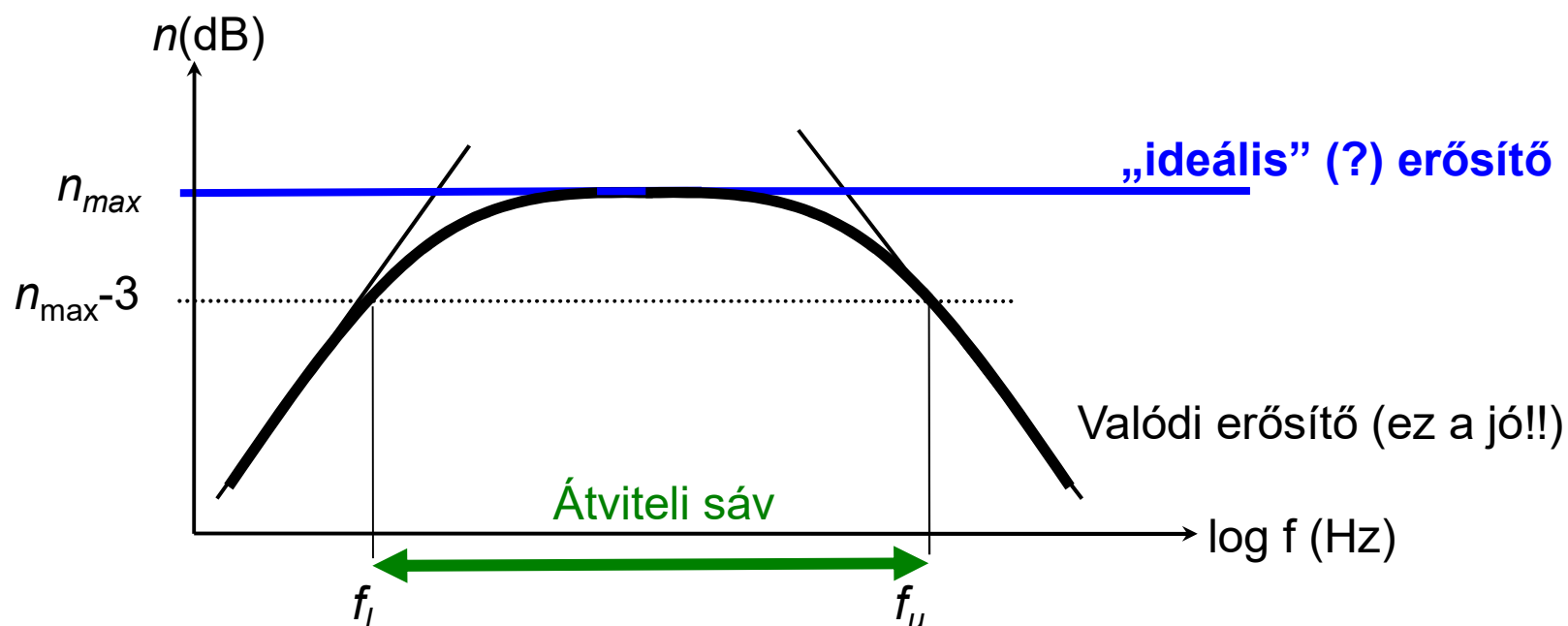
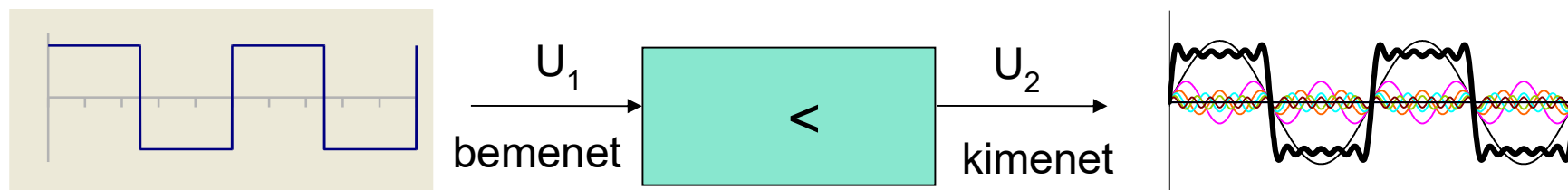


$$U_{ki} = \frac{1}{\sqrt{1 + R^2 C^2 \omega^2}} U_{be}$$



$$U_{ki} = \frac{RC\omega}{\sqrt{1 + R^2 C^2 \omega^2}} U_{be}$$

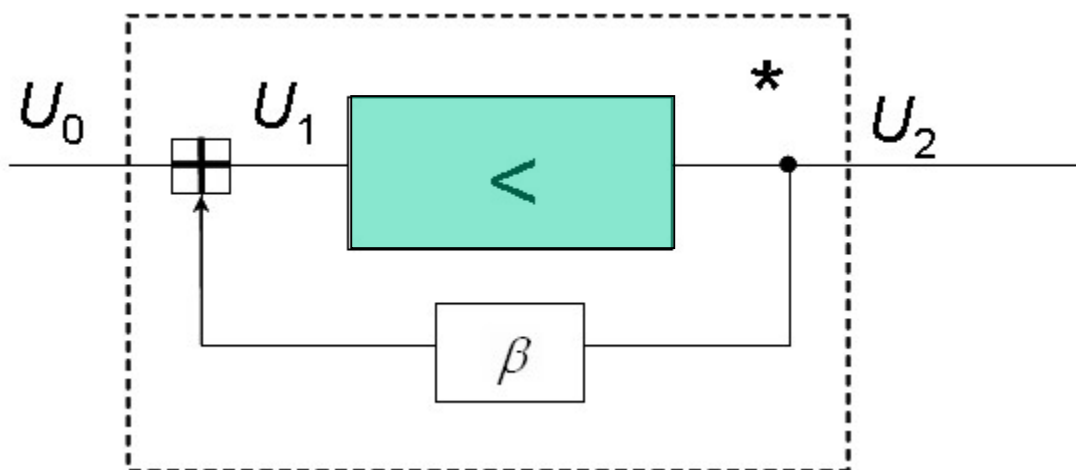
Erősítők vizsgálata - átviteli függvény



Az átviteli sávnak tartalmaznia kell a hasznos jel minden frekvencia-komponensét

De szélesebbnek sem kell lennie, hiszen a többi frekvencia csak a zajtól származhat!

Erősítők vizsgálata - átviteli függvény



visszacsatolással

Az átviteli sáv módosítható

⊕ Összegzési pont:

$$(a) \quad U_1 = U_0 + \beta U_2$$

$$(b) \quad A_U = \frac{U_2}{U_1} \quad \text{fesz. erősítés}$$

$$(c) \quad A_U^* = \frac{U_2}{U_0} = \frac{U_1 A_U}{U_0} = \frac{(U_0 + \beta U_2) A_U}{U_0} = A_U + \beta \frac{U_2}{U_0} A_U = A_U + \beta A_U^* A_U$$

$$A_U^* - \beta A_U^* A_U = A_U$$

$$A_U^* = \frac{A_U}{1 - \beta A_U}$$

fesz.erősítés visszacsatolással

$\beta > 0$: positive feedback

$\beta < 0$: negative feedback

$A_U \beta = 1$: oscillator (output without input signal: signal generator)

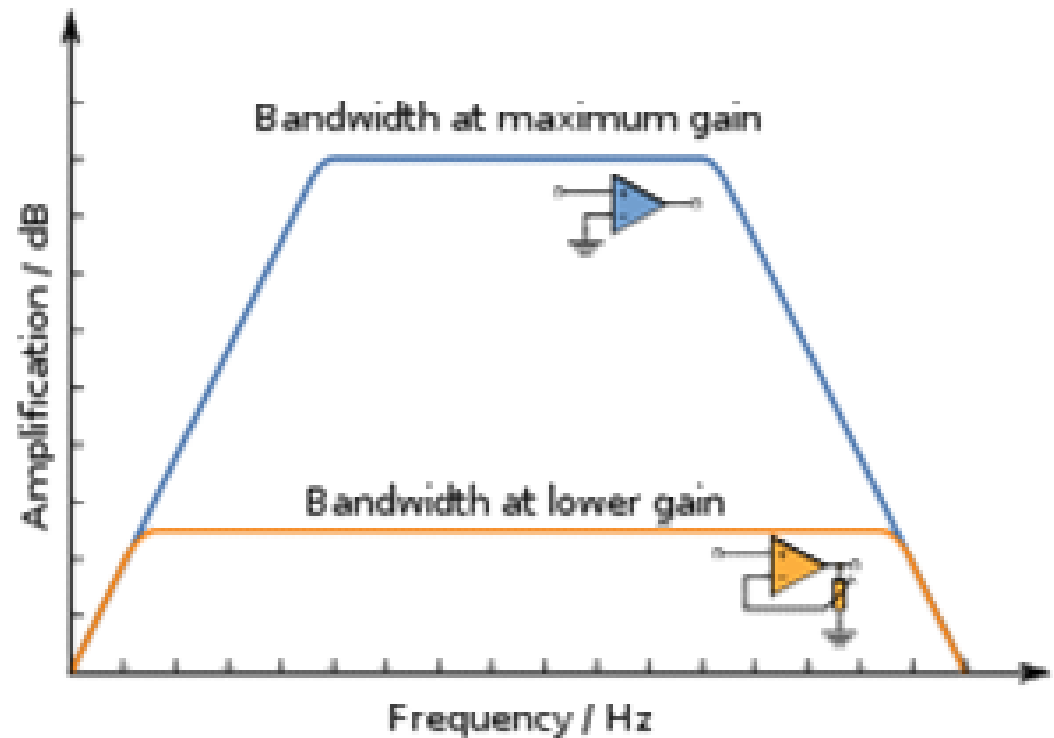
Vigyázat: $n=20 \cdot \log A$

Erősítők vizsgálata - átviteli függvény

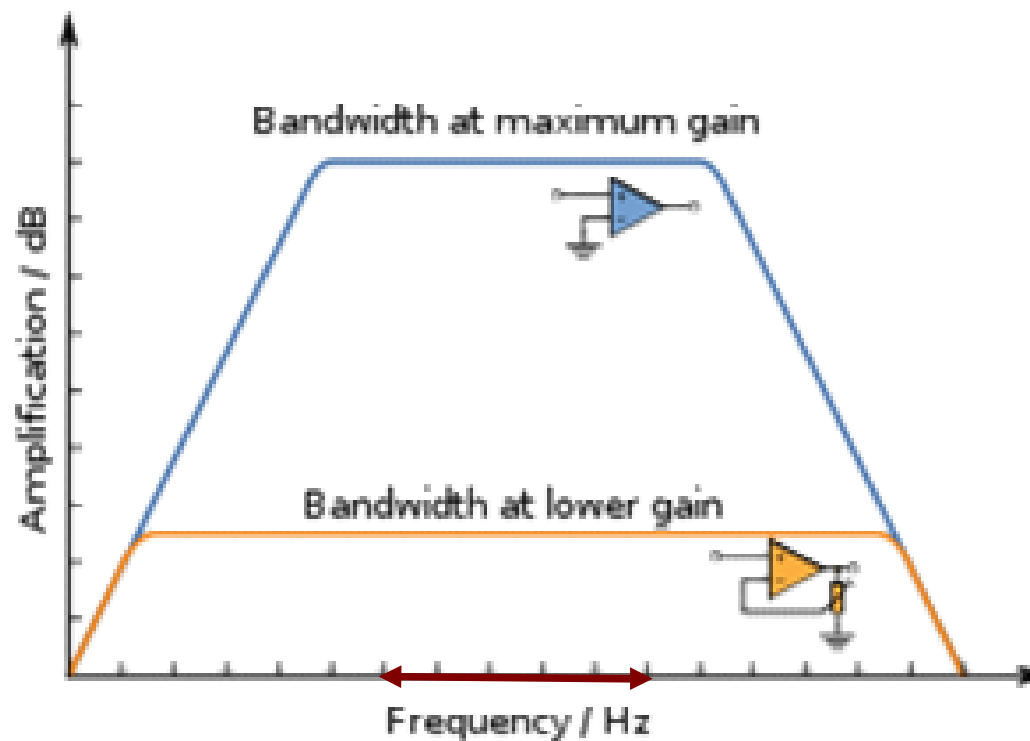
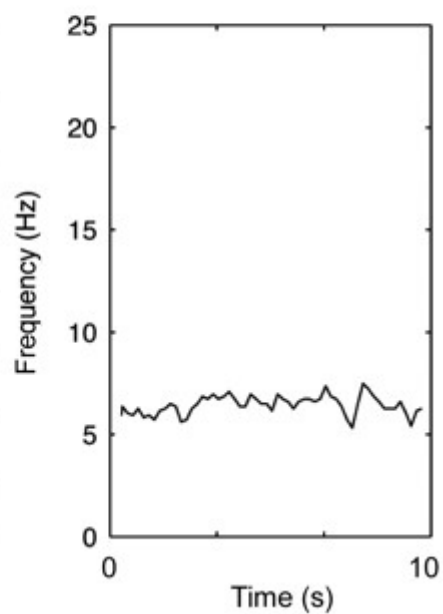
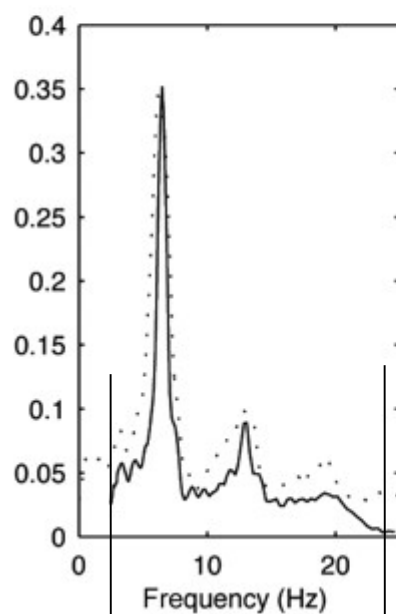
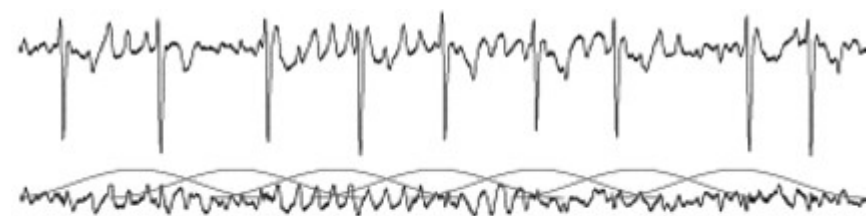
Gain Bandwidth Product

Erősítési tényező · sávszélesség = állandó

Az erősítő által hozzátett energiát vagy széles sávban alacsonyabb erősítésre, vagy keskeny sávban nagyobb erősítésre lehet használni.



Erősítők vizsgálata - átviteli függvény

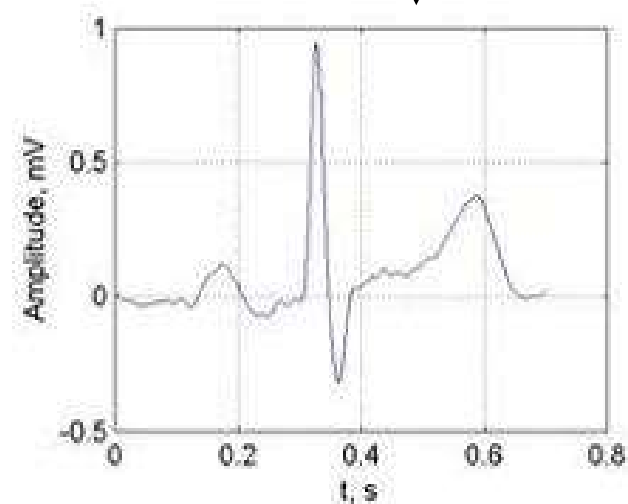
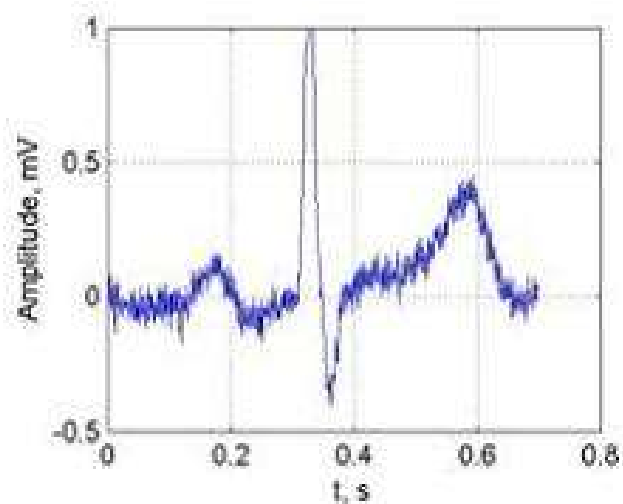
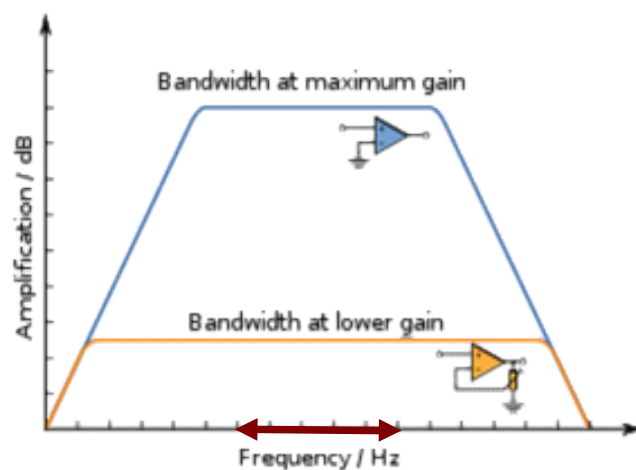
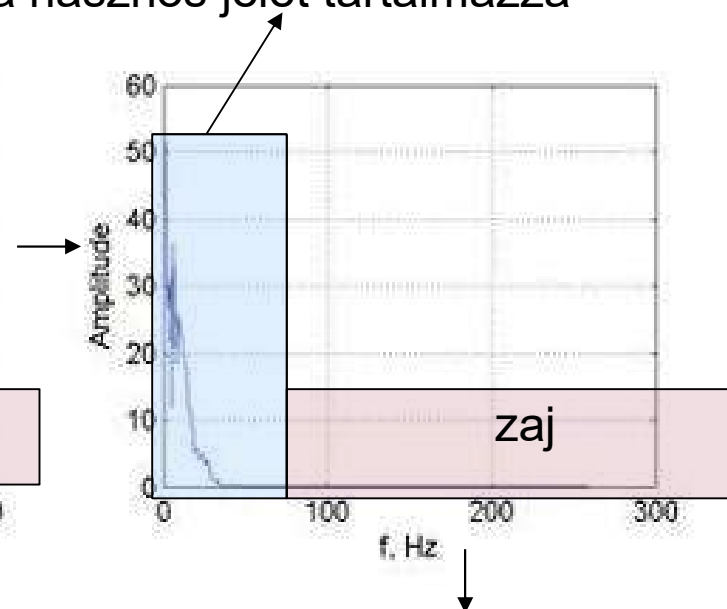
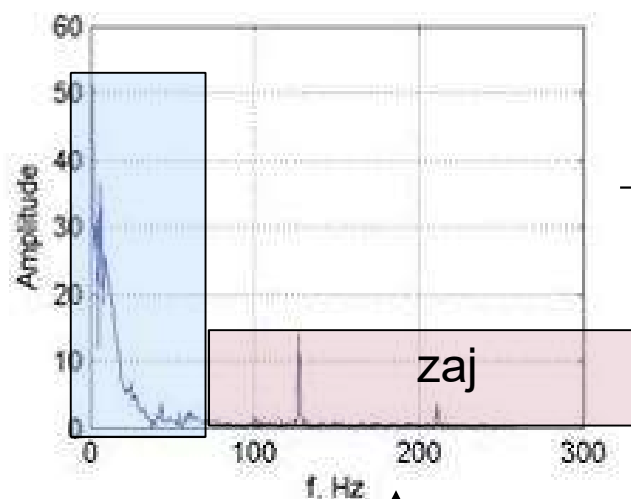
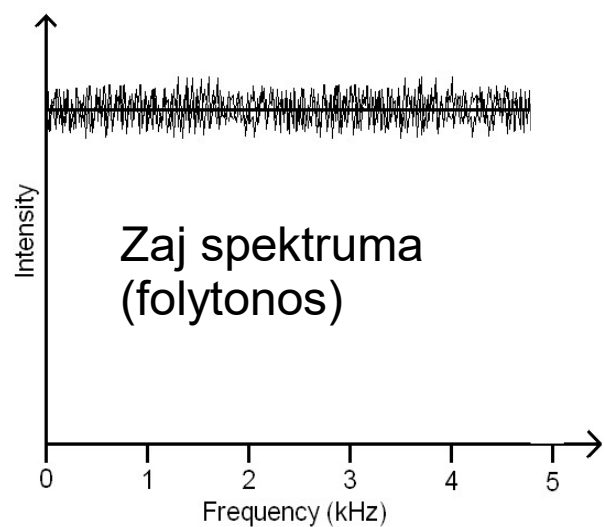


A jel frekvencia-spektrumához kell igazítani az átviteli sávot!

Információ megőrzés = spektrum-megőrzés.

Erősítők vizsgálata - átviteli függvény

Fourier-szűrés



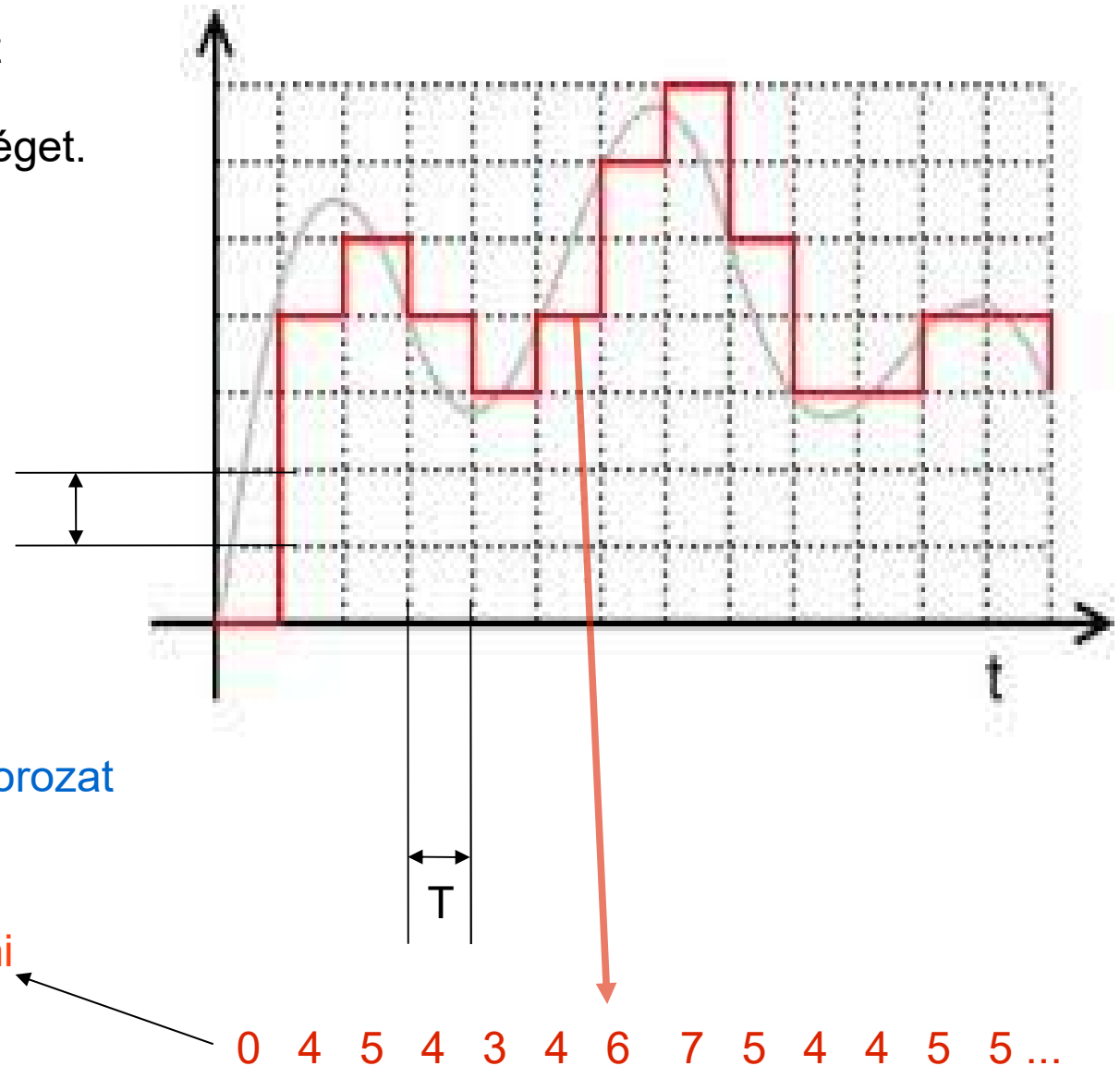
Digitális jelek– A/D átalakítás (ADC)

Az analóg jelet T időközönként
mintavételezzük,
Azaz megmérjük pl. a feszültséget.
A mért értékeket számsorként
tároljuk

Mérési pontosság
(bitek száma!)

Időben és értékekben diszkrét sorozat

A számsort veszteség és további zaj
nélkül lehet feldolgozni és továbbítani

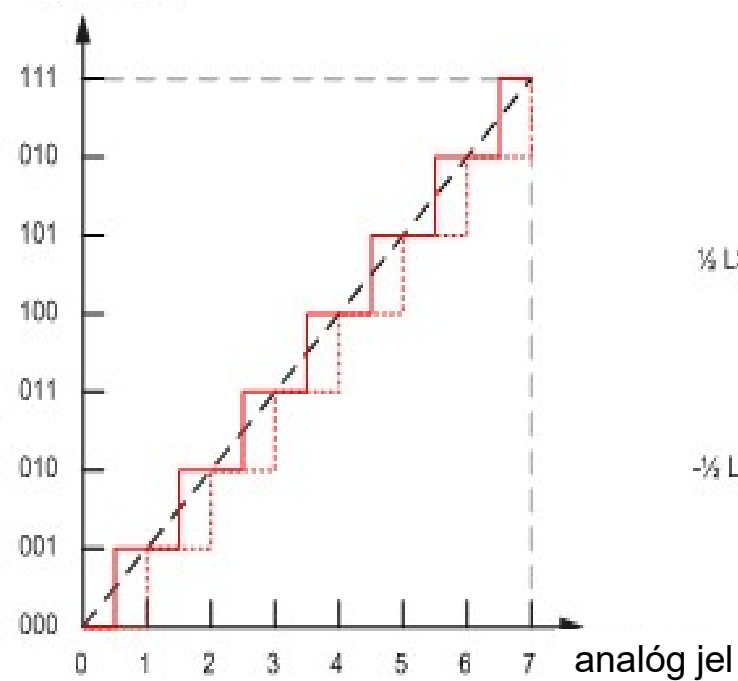


Digitális jelek - Kvantálás

Mi történik a köztes értékekkel?

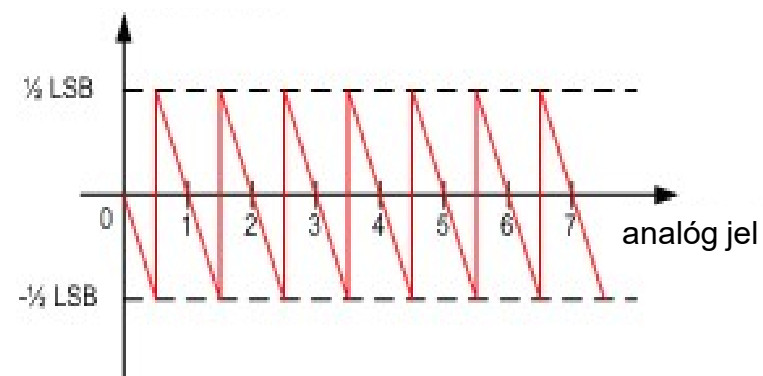
Elvesznek!

Digitális jel



(a)

Kvantálási hiba

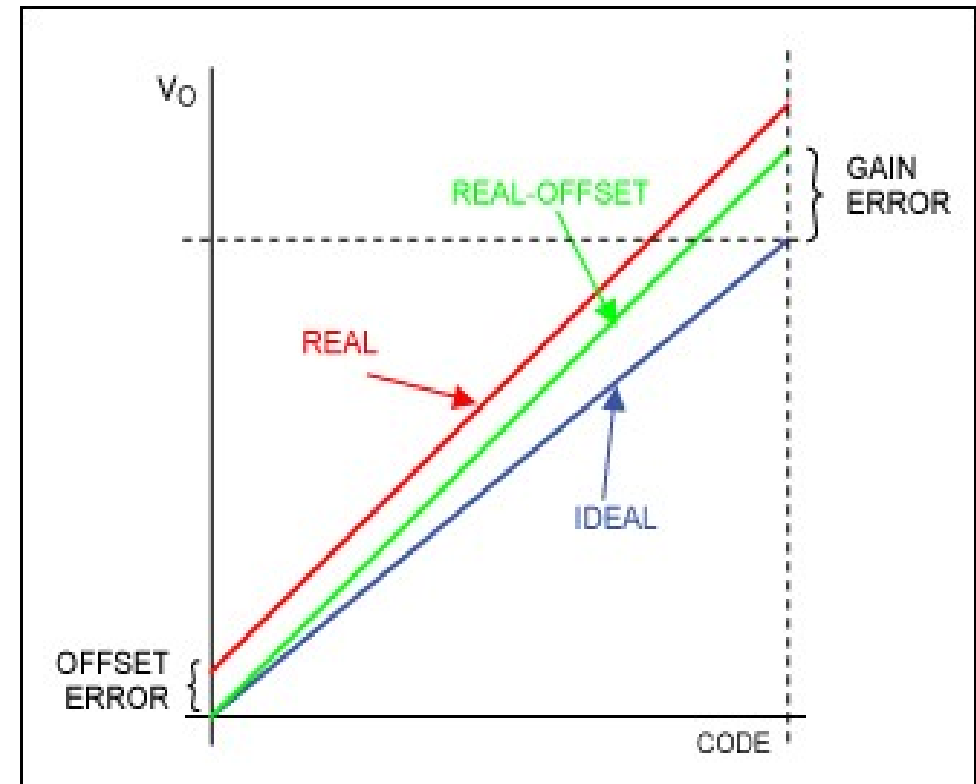
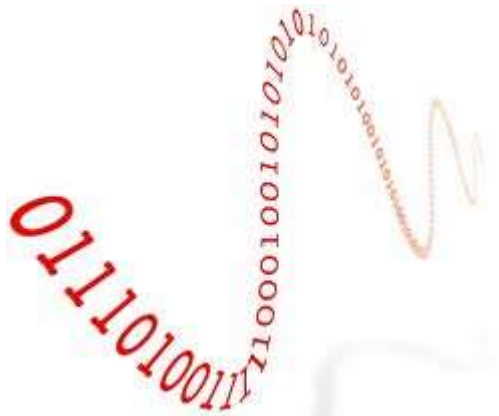


(b)

Digitális analóg átlalkítás (DAC)

Számsorból analóg jel visszanyerése

Ez technikailag egyszerűbb,
kész megoldások vannak



Lehetséges hibák
(elkerülhető)

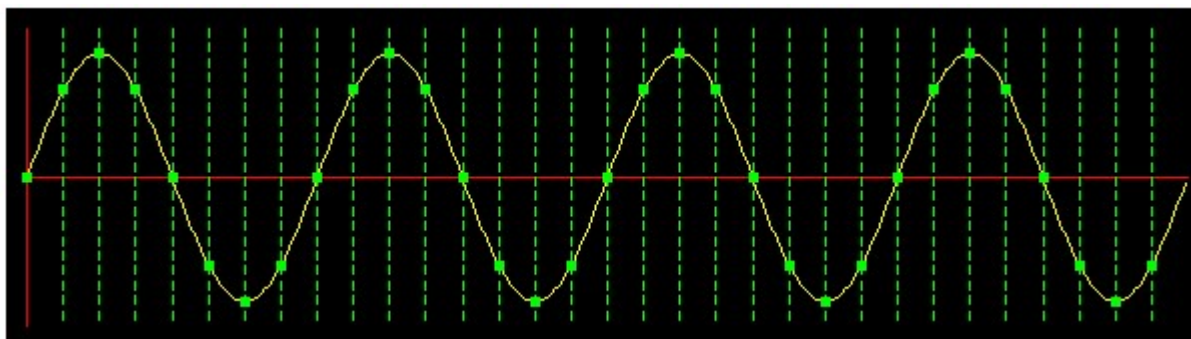
Digitális jelek – Mintavételezés

Ha nem szinuszos a jel: minden frekvencia-komponenst kezelni kell.

$$f = 1000 \text{ Hz}$$

$$f_s = 8000 \text{ Hz}$$

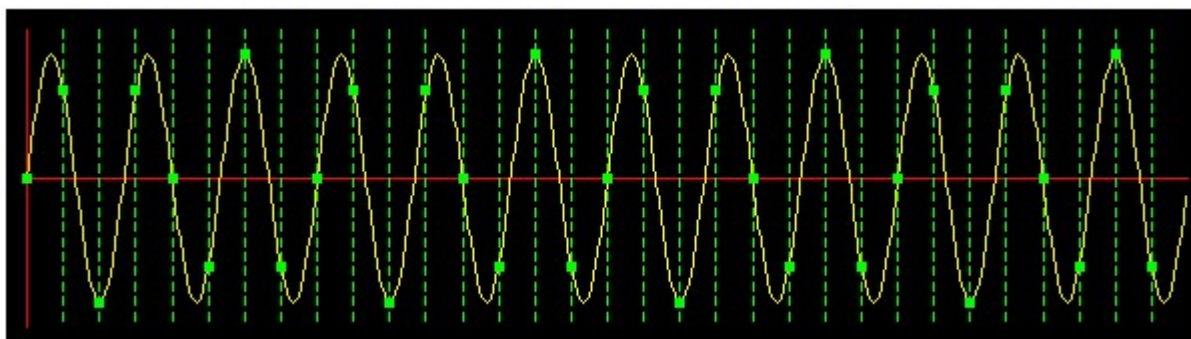
OK



$$f = 3000 \text{ Hz}$$

$$f_s = 8000 \text{ Hz}$$

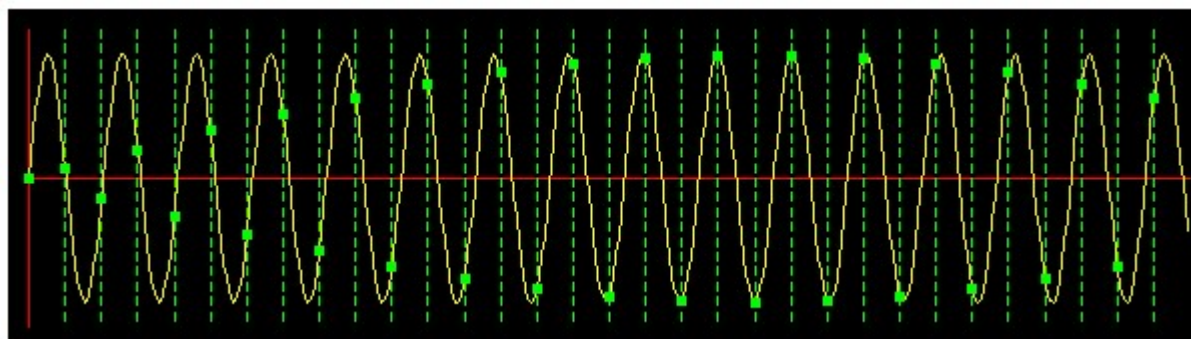
Még jó



$$f = 3900 \text{ Hz}$$

$$f_s = 8000 \text{ Hz}$$

Még jó



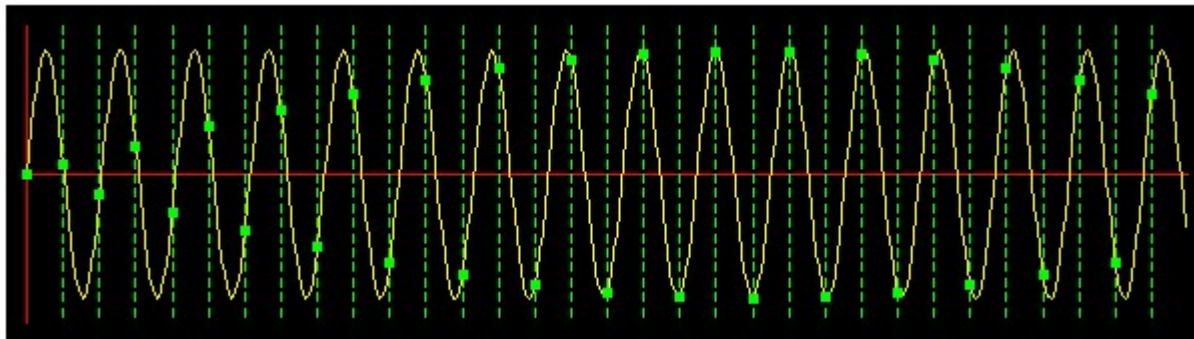
Digitális jelek – Mintavételezés

Ha nem szinusos a jel: minden frekvencia-komponenst kezelni kell.

$$f = 3900 \text{ Hz}$$

$$f_s = 8000 \text{ Hz}$$

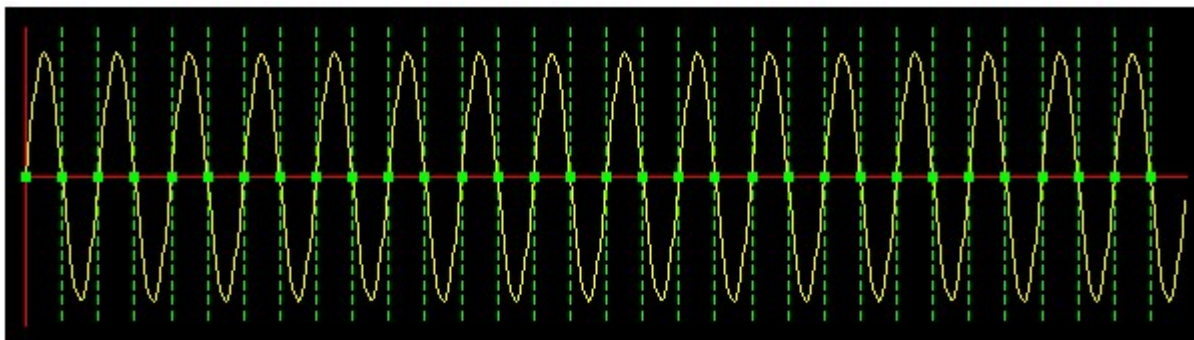
Még jó



$$f = 4000 \text{ Hz}$$

$$f_s = 8000 \text{ Hz}$$

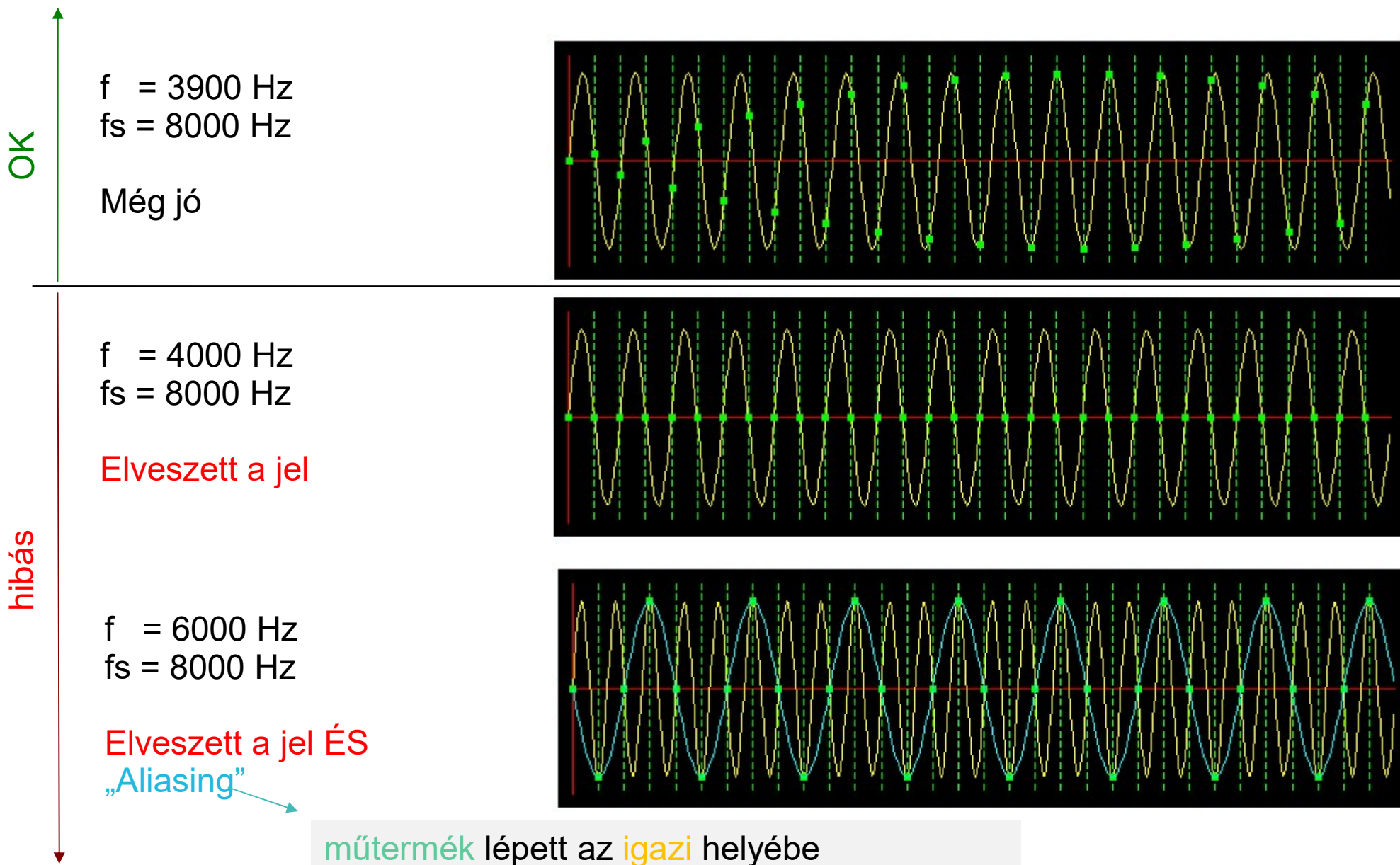
elvesztettük



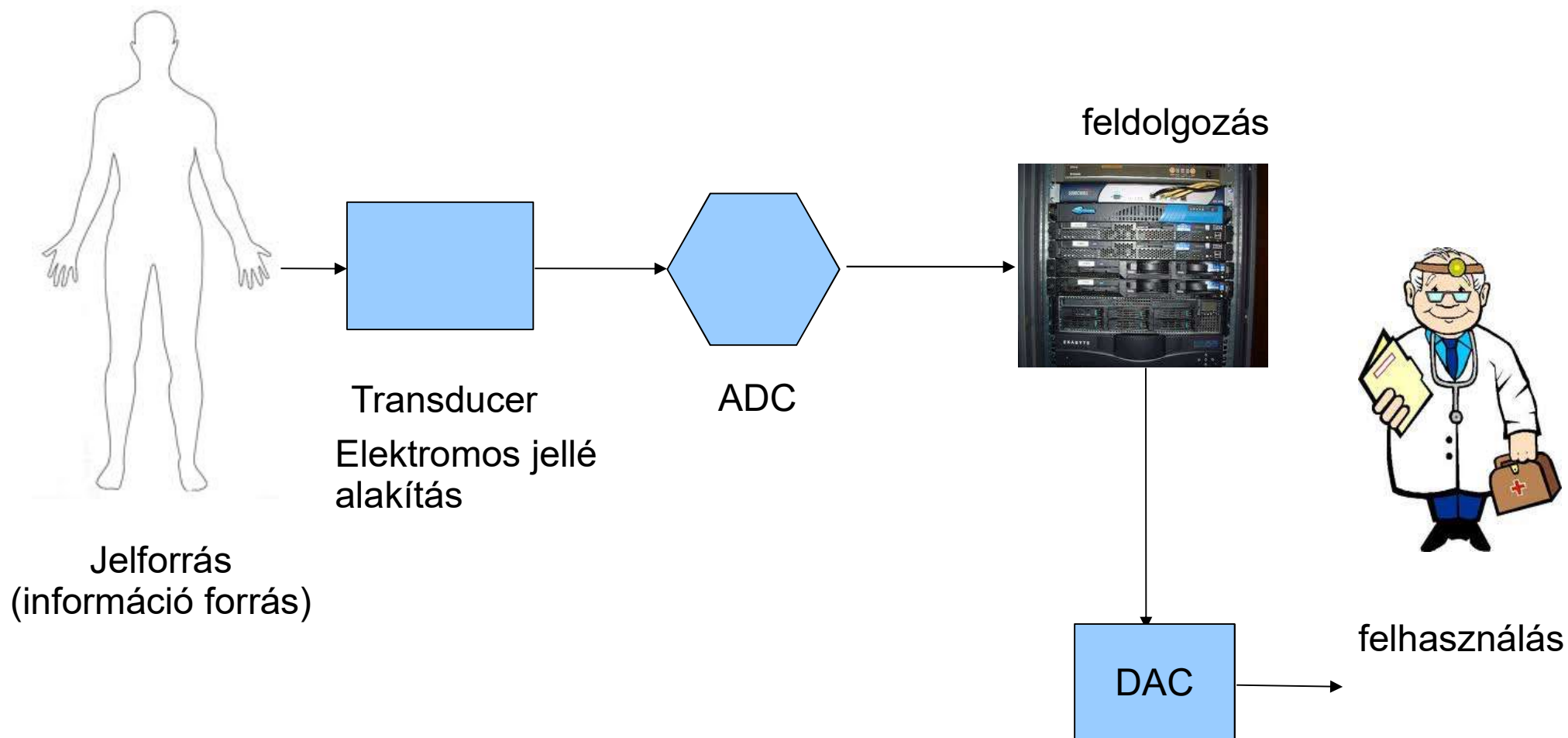
Nyquist tétel: a mintavételezési frekvencia (f_s) legalább a maximális jel-frekvencia 2x-e legyen

Digitális jelek – Mintavételezés

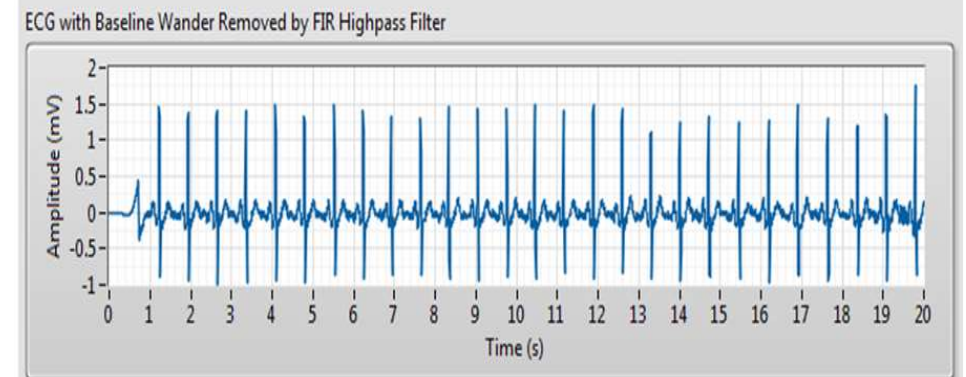
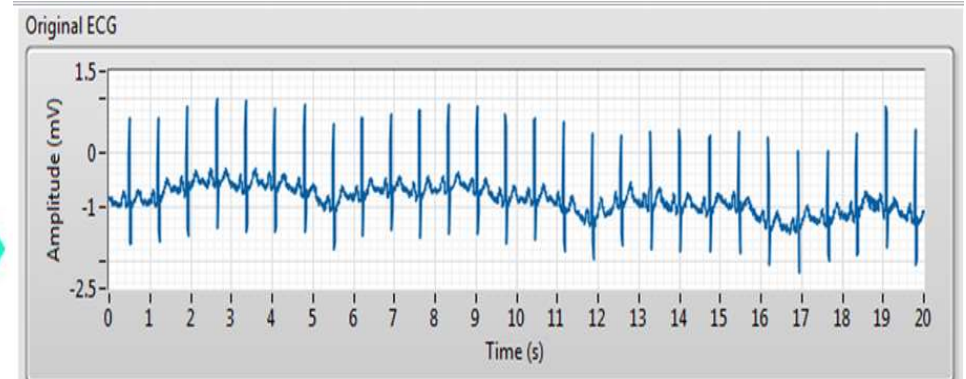
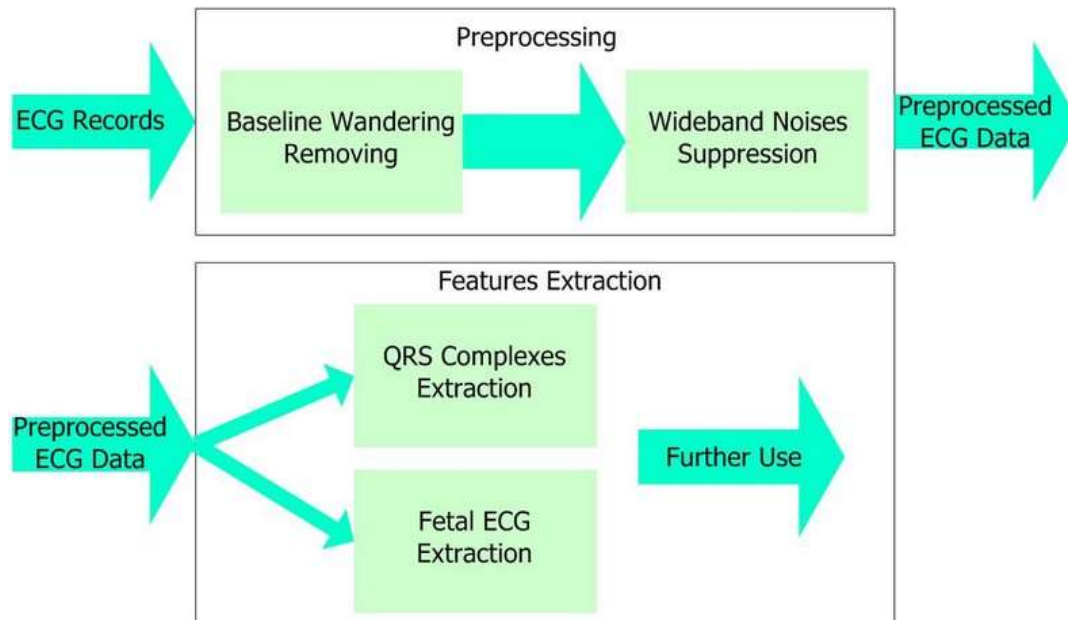
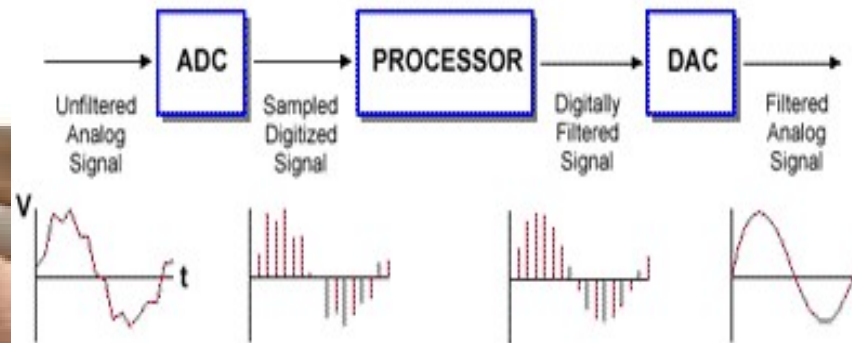
Nyquist tétel: a mintavételezési frekvencia (f_s) legalább a maximális jel-frekvencia 2x-ese legyen



Digitális jelfeldolgozás (DSP: Digital Signal Processing)



Körülvesz bennünket a digitális jelfeldolgozás

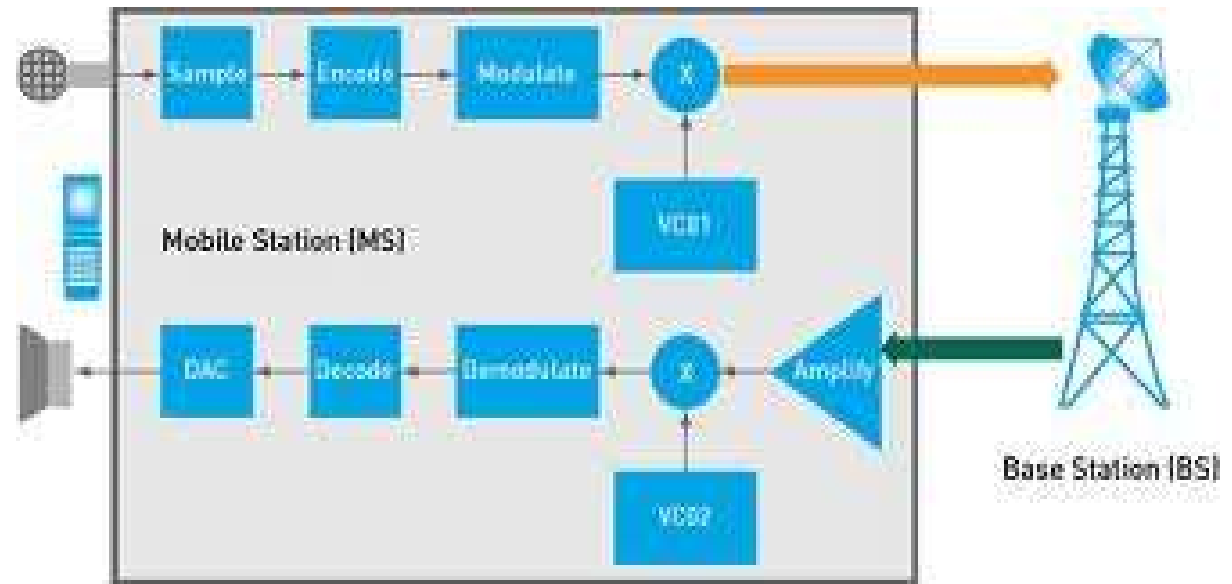


DSP in everyday life

Digital data can be further manipulated : encoded/decoded/compressed,etc.

Cell phone

Sample, encode,transmit,decode,DAC



CD/DVD player

Light: digital 1010110...

DAC: from stream of numbers

Analog music / video

