

Fourier térbeli analízis

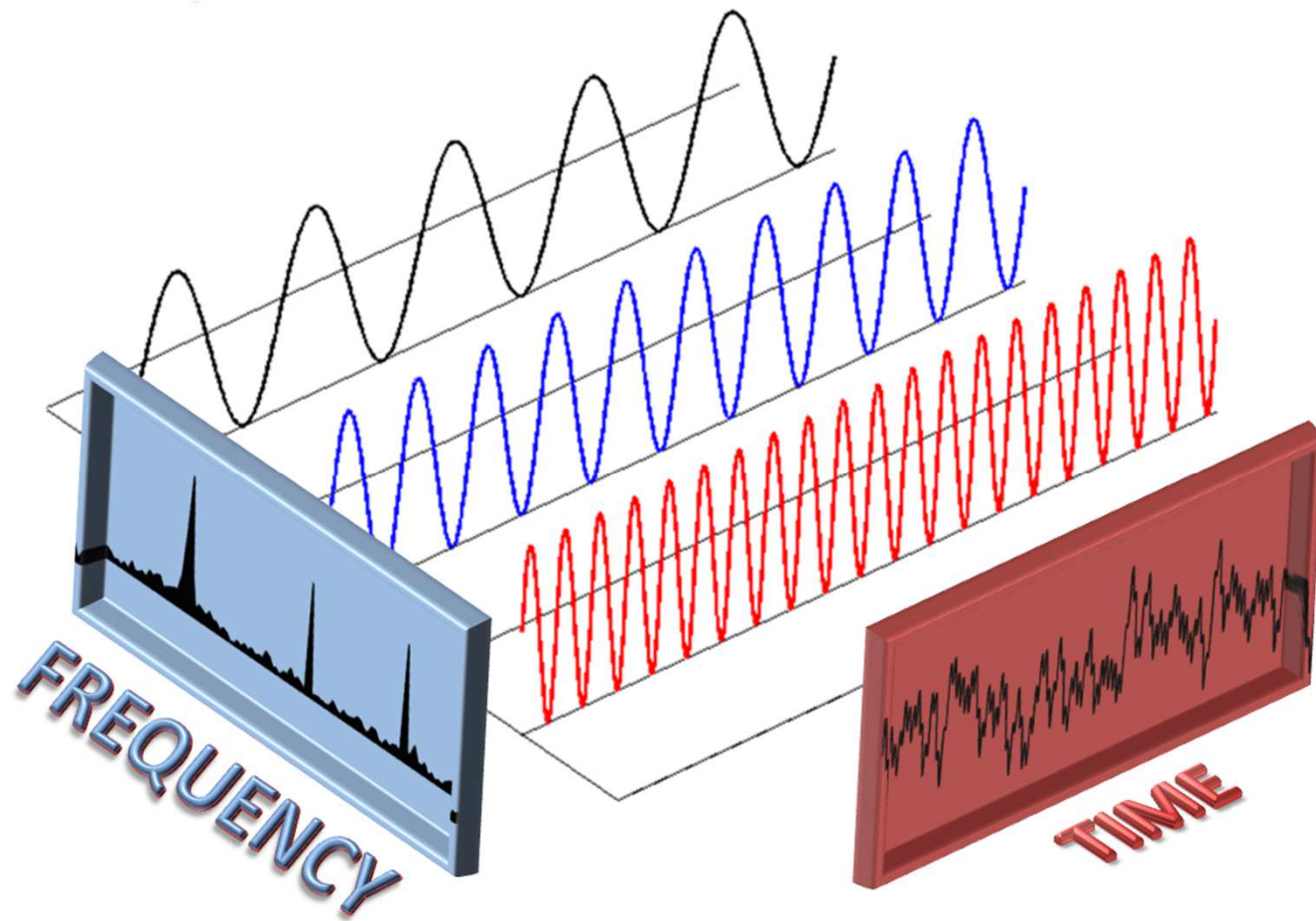
Orvosi képdiagnosztika

2022 ősz

Előadás témái

- Fourier transzformációk és kapcsolataik:
 - FS, FT, DTFT, DFT, DFS
 - Mintavételezés, interpoláció

Folytonos Fourier Transzformáció



Folytonos Fourier Transzformáció

- Lineáris transzformáció a véges energiájú, folytonos függvények tere felett:

$$- F(\omega) = FT\{f\} = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \exp\{-j \cdot x \cdot \omega\} dx$$

$$- f(x) = FT^{-1}\{F\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) \exp\{j \cdot x \cdot \omega\} d\omega$$

- Legfontosabb tulajdonságai:

$$- \text{Konvolúció tétele: } (f * g) = FT^{-1}\{(F \cdot G)(\omega)\}$$

$$- \text{Fordított konvolúció: } ((f \cdot g)(x)) = \frac{1}{2\pi} FT^{-1}\{F * G\}|_x$$

$$- \text{Parseval tétele: } E = \int_{-\infty}^{\infty} f^2(x) dx = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |F(\omega)|^2 d\omega$$

Folytonos Fourier Transzformáció

– Valós jel spektruma: $F(-\omega) = \overline{F(\omega)}$

– Páros, valós jel spektruma:

$$F(-\omega) = \operatorname{Re}\{F(-\omega)\} = \operatorname{Re}\{F(\omega)\} = F(\omega)$$

– Páratlan, valós jel spektruma:

$$F(-\omega) = \operatorname{Im}\{F(-\omega)\} \cdot j = \operatorname{Im}\{F(\omega)\} \cdot (-j) = \overline{F(\omega)}$$

– Periodikus jel spektruma diszkrét:

$$F(\omega) = 0, \text{ ha } \omega \neq k \cdot (2\pi \cdot f) \Big|_{k \in \mathbb{Z}}$$

– Ekvivalens egy unitér transzformációval:

- Ez pl. maga után vonja a bijektivitást

Folytonos Fourier Sorfejtés

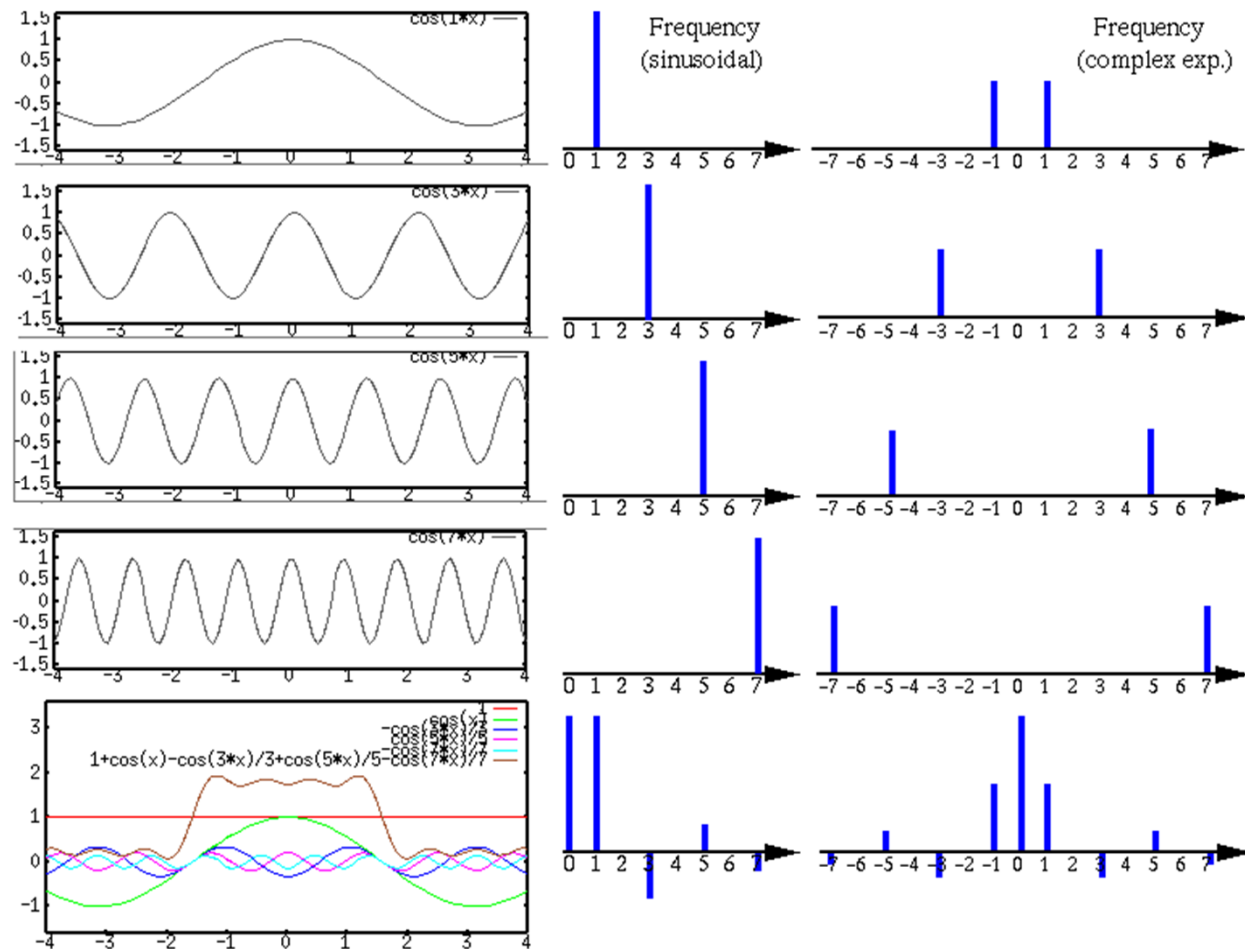
- Lineáris transzformáció a periodikus folytonos függvények tere felett:

$$- c_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(x) \cdot \exp(-j \cdot x \cdot 2\pi n/T) dx; \quad n \in Z$$

$$- f(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n \cdot \exp\{j \cdot x \cdot 2\pi n/T\}$$

- Kapcsolat a folytonos FT-val:
 - Mintavételezi a spektrumot: $c_n \propto F(2\pi \cdot n/T)$
 - Periodikus jel $\Leftrightarrow$ diszkrét spektrum
 - Egyéb tulajdonságokat örökli a folytonos FT-től

Folytonos Fourier Sorfejtés – 1D



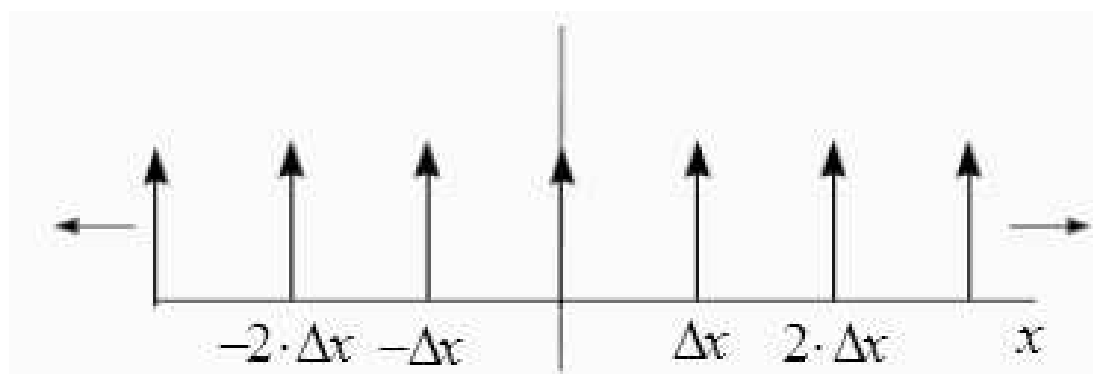
Diszkrét idejű Fourier Transzformáció (DTFT)

- Adott egy mintavételezéssel előállt végtelen hosszú, abszolút összegezhető jel: $f[n]$
- Definíció:
 - $X(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] \exp\{-j \cdot \omega \cdot n\}$
 - $x[n] = 1/2\pi \cdot \int_{-\pi}^{\pi} X(\omega) \exp\{j \cdot \omega \cdot n\} d\omega$
- Alapvető tulajdonságok:
 - $n \in Z$, de $\omega \in R$
 - $X(\omega + 2 \cdot k \cdot \pi) \big|_{k \in Z} = X(\omega)$
 - Egyéb tulajdonságait örökli a folytonos FT-től

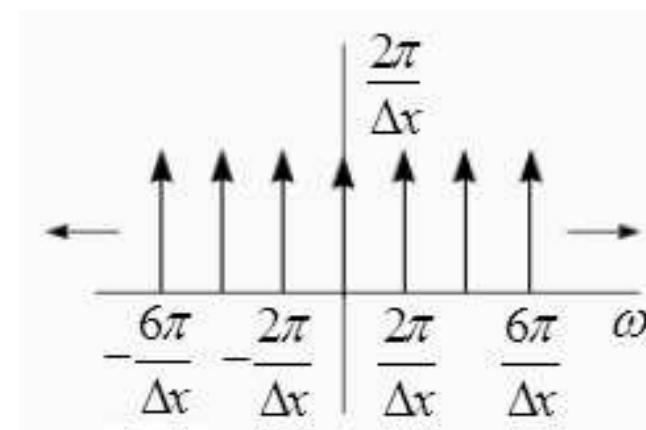
Matematikai mintavételezés

Folytonos FT és DTFT kapcsolata

- Végtelen impulzus fésű:
 - Matematikai mintavételezés: folytonos jel elemenkénti szorzata az impulzus fésűvel.
 - Időtartománybeli szorzás $\Leftrightarrow$ Spektrumok konvolúciója



Impulzuszűz az időtartományban



frekvenciatartományban

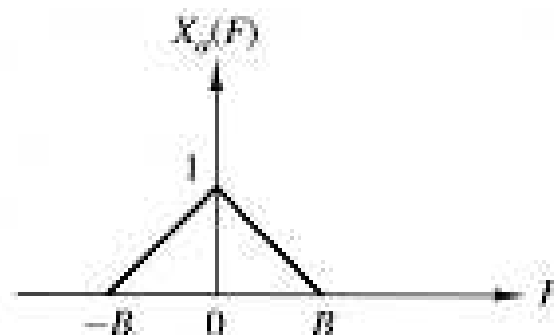
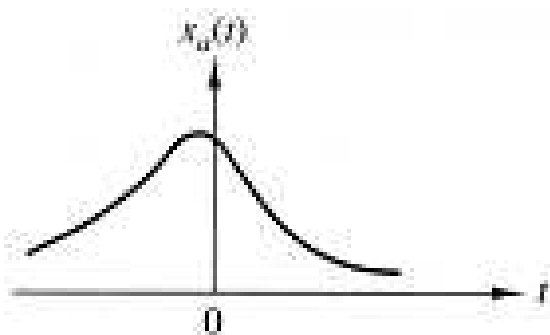
Mintavett jel spektruma

- Formálisan a mintavett jel spektruma:

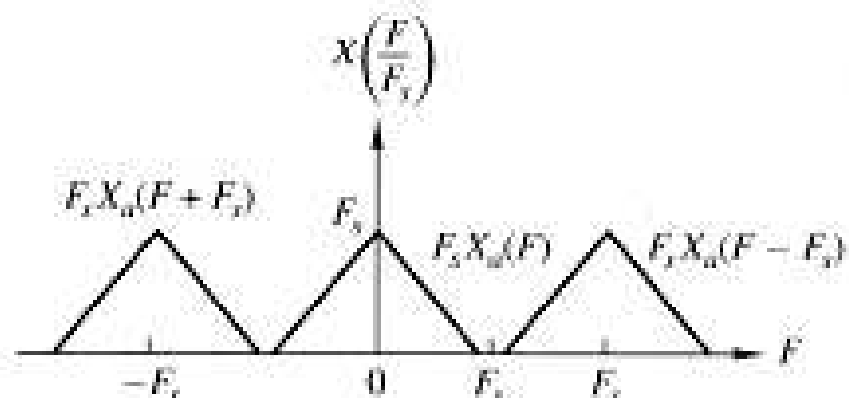
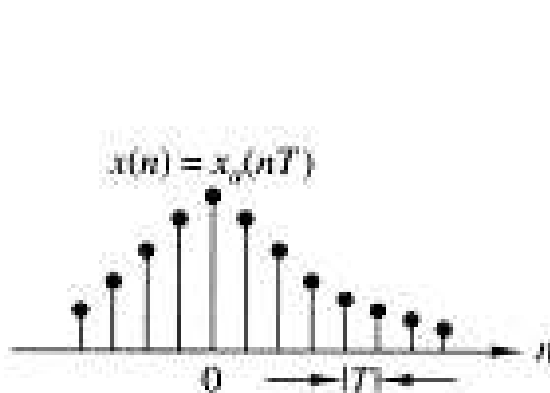
$$X_s(\omega) = \frac{2\pi}{\Delta x} X(\omega) * \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - k \cdot \frac{2\pi}{\Delta x}\right) = \frac{2\pi}{\Delta x} \sum_k X\left(\omega - k \cdot \frac{2\pi}{\Delta x}\right)$$

- Δx : mintavételezések távolsága
 - $X(\omega)$: folytonos idejű jel spektruma
 - $X_s(\omega)$: mintavételezett jel spektruma
- Nyquist mintavételi törvény:
 - $bw\{x\} < (1/2) \cdot f_s$; $f_s = (1/\Delta x)$
 - Ha nem tartjuk be alul mintavételezés: $K \cdot X_s(\omega) \neq X(\omega)$

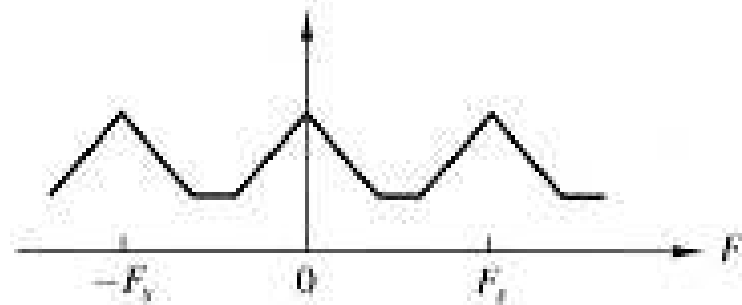
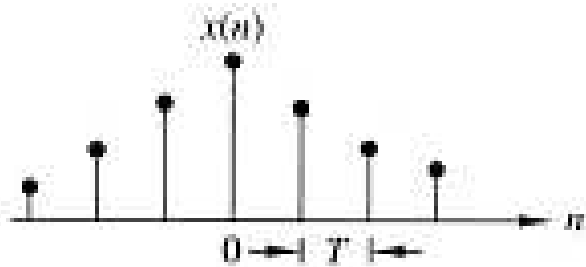
Helyesen mintavételezés interpretációja



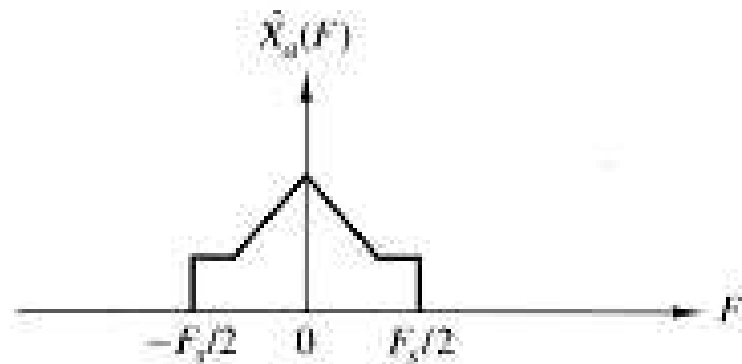
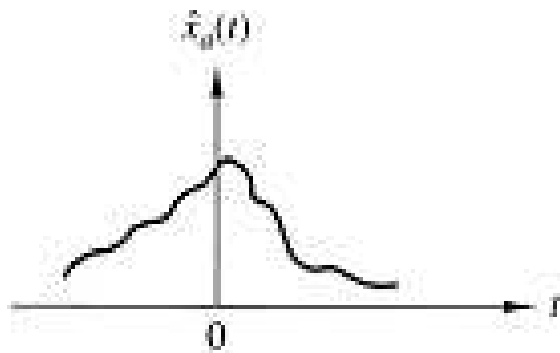
(a)



Alul mintavételezés interpretációja spektrum átlapolódása



(d)



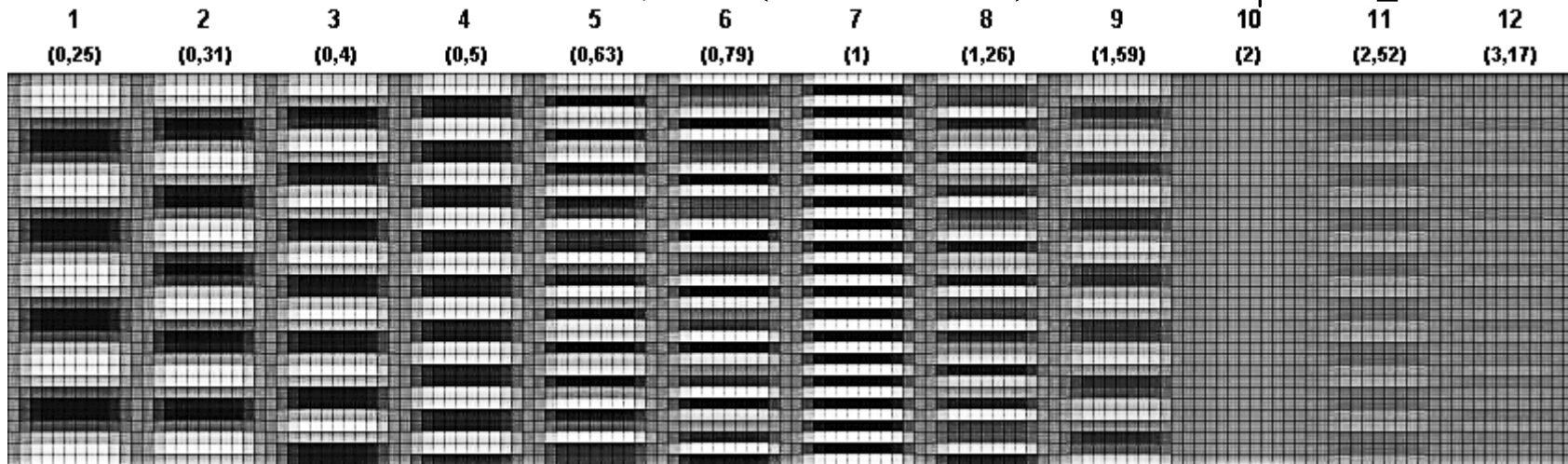
Spektrum átlapolódása moire / aliasing

- Spektrum átlapolódása által generált jeltorzulás



Spektrum átlapolódása - aliasing

- Aliasing : $X_s(\omega) \propto \sum_k X\left(\omega - k \cdot \frac{2\pi}{\Delta x}\right) \neq X(\omega) \Big| \omega \in \left[-\frac{\pi}{\Delta x}, \frac{\pi}{\Delta x}\right]$



- Anti-aliasing filter – mintavételezés előtti alul-áteresztő szűrés:
 - Pl. Bayer szűrős fényképezőgépeknél optikai szűrő
 - Radiológiában az elkent PSF-ek miatt elhagyható

Mintavett jel rekonstrukciója

- Rekonstrukció (interpoláció):
 - Cél: a mintavételezett jel értékének előállítása két mintavételezési pont között
 - Ha sérült a mintavételezési törvény, akkor lehetetlen
 - LTI rendszerrel: $x_R = x_S * h_R$
 - Ideális interpolációs kernel:
 - $H_R(\omega) = \begin{cases} K & |-\omega_L \leq \omega \leq \omega_L \\ 0 & \text{egyébként} \end{cases} \quad \omega_L = 2\pi \cdot f_s / 2$
 - $h_R \propto \text{sinc}(\omega_L \cdot x)$

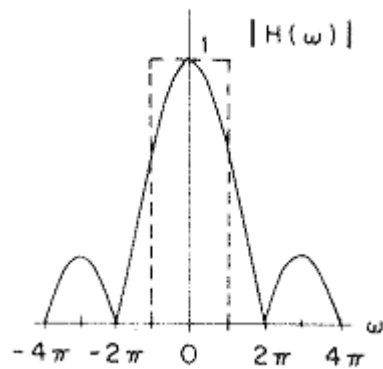
Interpoláció hibái

- Megfigyelt tartomány széle:
 - Súlyfüggvény „kilóg” a megfigyelt tartományból
- $|H_R(\omega)| \neq 0 \quad |\omega| > 2\pi f_s/2$ esete:
 - Lényegesen jelentősebb hibaforrás
 - Mintavett jel rekonstrukciója:
 - $X_R(\omega) = H_R(\omega) \cdot X_S(\omega) \propto \sum H_R(\omega) \cdot X\left(\omega - k \cdot \frac{2\pi}{\Delta x}\right)$
 - $X_R(\omega) \neq X(\omega)$, ha $|\omega| > 2\pi f_s/2$
 - Példa rá a Nearest Neighbour interpoláció (ZOH)

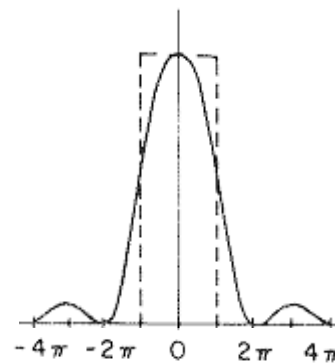
Interpolációk összehasonlítása

- Átviteli/súlyfüggvényük analízisével:

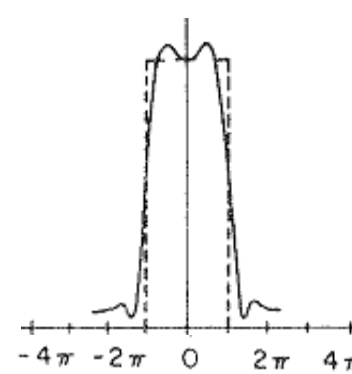
Nearest Neighbour



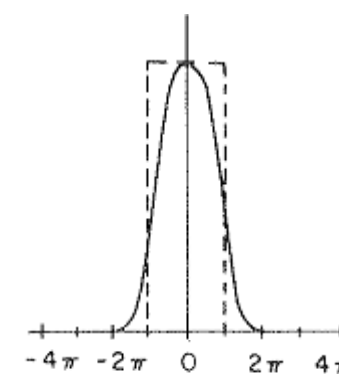
Lineáris



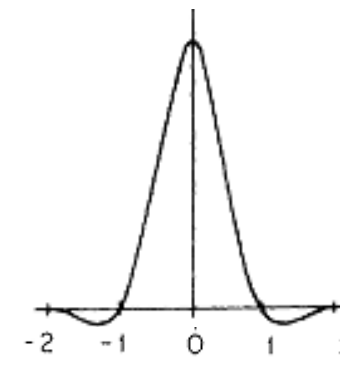
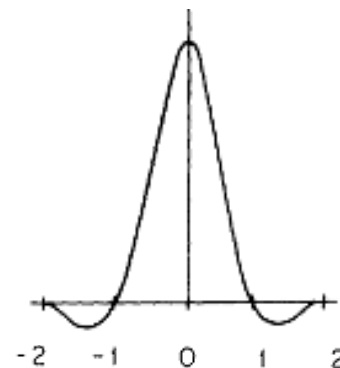
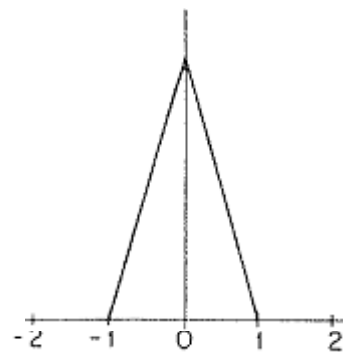
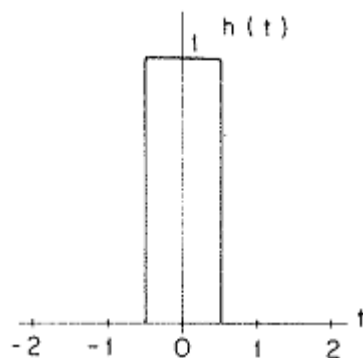
Köbös Spline



Köbös B-Spline

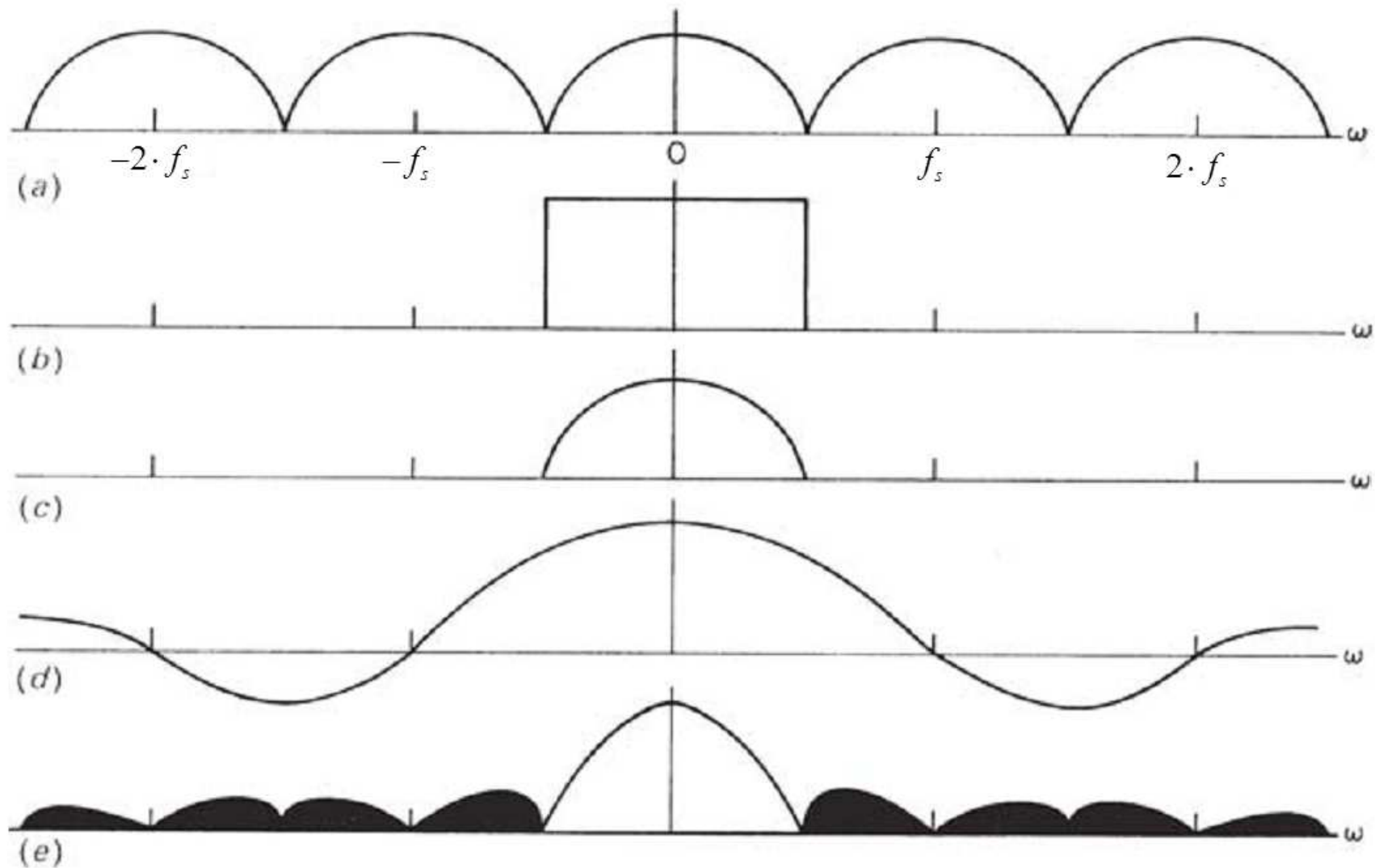


Átviteli függvény



Súlyfüggvény

(Hibás) interpoláció vizualizációja



Integráló mintavételezés

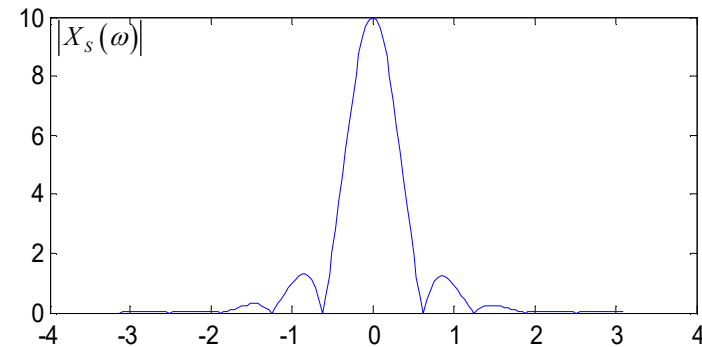
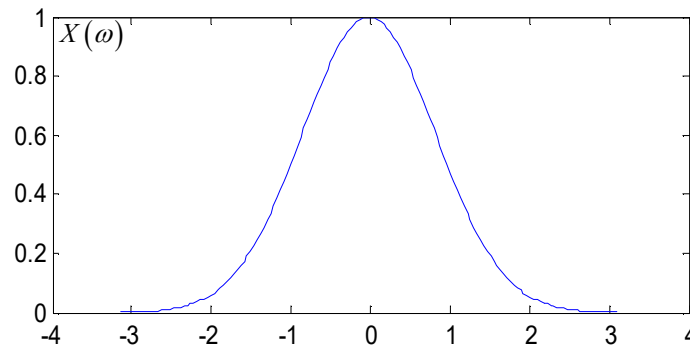
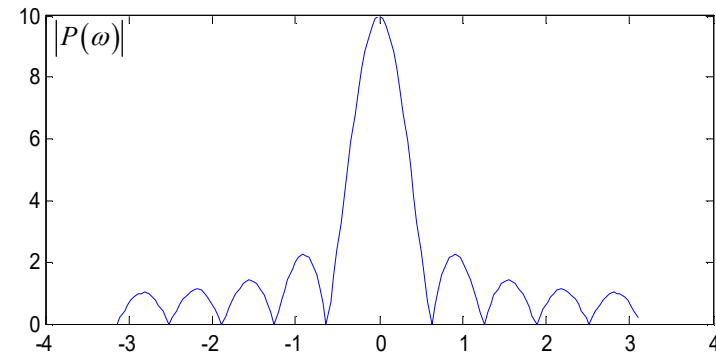
- Érzékelők integrálják a fotonokat:
 - Érzékelőelemek **homogén** súlyfüggvénye: $p(x)$
 - Adekvát az alábbi modell:
 1. Megszűrjük a folytonos jelet az érzékelők súlyfüggvényével
 2. Elvégezzük a matematikai mintavételezést
$$X_s(\omega) \propto (X(\omega) \cdot P(\omega)) * \left(\sum_{j=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - k \cdot \frac{2\pi}{\Delta x}\right) \right)$$
 - Ha az érzékelőelemek súlyfüggvénye nem homogén, akkor nem modellezhető LTI rendszerrel

Integráló mintavételezés - példa

- Ideális, integráló mintavételezés esete:

$$- p(x) = \begin{cases} 1/\Delta_x & |x| < \Delta_x/2 \\ 0 & |x| > \Delta_x/2 \end{cases}$$

$$- P(\omega) = \text{sinc}(\Delta x \cdot \omega/2)$$



Diszkrét Fourier Transzformáció (DFT)

- Diszkrétizált jelet N pontban ismerjük:

$$- X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot \exp\{-j \cdot n \cdot (k \cdot 2\pi/N)\} = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot \exp\{-j \cdot n \cdot k \cdot \Delta\omega\}$$

$$- x[n] = (1/N) \cdot \sum_{k=0}^{N-1} X_k \cdot \exp\{j \cdot 2\pi kn/N\}$$

- Kapcsolat a DTFT-vel:

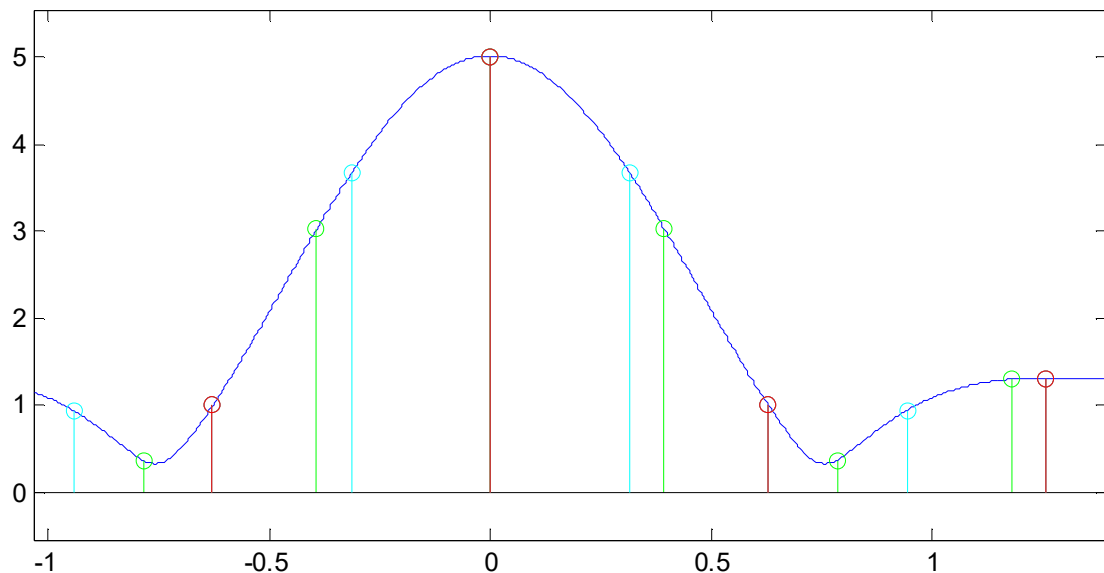
$$- x[n] = \begin{cases} y[n] & n \in [0, 1, \dots, N-1] \\ 0 & \text{egyébként} \end{cases} \quad \text{megfigyelési ekvivalens}$$

- DFT mintavételezi a megfigyelési ekvivalens DTFT spektrumát: $Y_k = X(k \cdot \Delta\omega)$

- C^N feletti ortogonális transzformáció, mi a mátrixa?

DFT pontszáma

- Megfigyelési ekvivalens DTFT spektrumát tetszőleges felbontással mintavételezhetjük:
 - Ha M minta érdekel, akkor $M-N$ db 0-val paddelünk
 - A fizikai (folytonos) jel spektrumáról ezáltal nem tudunk meg többet!
 - 2-Radix FFT



DFT és a DFS kapcsolata

- A DFT által meghatározott spektrum diszkrét:

$$\begin{aligned} x[n] &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k \cdot \exp\{j \cdot 2\pi kn/N\} = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k \cdot \exp\{j \cdot (2\pi kn/N + 2\pi k)\} = x[n+N] \end{aligned}$$

- Lényegében **Diszkrét Fourier Sorfejtés (DFS)**
- DFT kapcsolata a Diszkrét Fourier Sorfejtéssel:
 - DFT időtartományban véges idejű diszkrét jelet vár
 - DFS periodikus, végtelen idejű diszkrét jelet vár
 - Ezt leszámítva identikusak.

DFT és FFS kapcsolata

- Vizsgáljuk a mintavételezett jelet folytonos időben:

$$\begin{aligned} - \quad x_s(t) &= x(t) \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - n \cdot \Delta t) \text{ és } x_s(t + N \cdot \Delta t) = x_s(t) \\ - \quad c_k &= \frac{1}{N \cdot \Delta_t} \int_{0-0}^{N\Delta t-0} x_s(t) \cdot \exp \left\{ -j \cdot t \cdot k \cdot \frac{2\pi}{N \cdot \Delta_t} \right\} dt = \\ &= \frac{1}{N \cdot \Delta_t} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot \exp \left\{ -j \cdot n \cdot \frac{k \cdot 2\pi}{N} \right\} \propto \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot \exp \{ -j \cdot n \cdot k \cdot 2\pi / N \} \end{aligned}$$

- Mintavételezés hatásai:
 - DFT felbontása: $\Delta f = f_s / N = 1 / (N \cdot \Delta_t)$ $\omega_k = 2\pi \cdot k \cdot \Delta f$
 - Aliasing (már volt)

DFT és FFS kapcsolata

- Vizsgáljuk a mintavételi időben:

A megfigyelt jelrészlet egy periódusa egy folytonos periodikus jelnek.

$$- x_s(t) = x(t) \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - n \cdot \Delta t) \text{ és } x_s(t + N \cdot \Delta t) = x_s(t)$$

FFS

$$- c_k = \frac{1}{N \cdot \Delta_x} \int_{0-0}^{N\Delta_x-0} x_s(t) \cdot \exp \left\{ -j \cdot t \cdot k \cdot \frac{2\pi}{N \cdot \Delta_x} \right\} dt =$$

$$= \frac{1}{N \cdot \Delta_x} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot \exp \left\{ -j \cdot n \cdot \frac{k \cdot 2\pi}{N} \right\} \propto \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot \exp \{ -j \cdot n \cdot k \cdot 2\pi / N \}$$

DFT

- Mintavételezés hatásai:

- DFT felbontása: $\Delta f = f_s / N = 1 / (N \cdot \Delta x)$ $\omega_k = 2\pi \cdot k \cdot \Delta f$
- Aliasing (már volt)

Spektrumszivárgás - ablakozás

- DFT kapcsolata a DTFT-vel és a DFS-el:
 - Impliciten cirkuláris jelet feltételez (DFS)
 - Tegyük fel, hogy az eredeti jelünk (végtelen terjedelmű) véges részét tudtuk mintavételezni:

$$h[n] = \text{rect}_T[n], \quad y[n] = y_\infty[n] \cdot h[n]$$

- Ideális esetben: $Y_{(k)} = Y_\infty(k \cdot \Delta\omega)$
- A valóságban: $Y_{(k)} = 1/2\pi \cdot (Y_\infty * H)(k \cdot \Delta\omega)$
- Cél lenne a DTFT spektrumot szivárgás nélkül mintavételezni: $Y_{(k)} := Y_\infty(k \cdot \Delta\omega)$

Spektrumszivárgás - ablakozás

- DFT kapcsolata a DTFT-vel és a DFS-el:

- Impliciten cirkuláris jelet feltételez (DFS)

- $\sum_{k=1}^T \delta[n-k]$, hogy Végtelen kiterjedésű mintavételezett jel (megfigyelési ekvivalens) ni:

$$h[n] = \text{rect}_T[n], \quad y[n] = y_\infty[n] \cdot h[n]$$

- Ideális esetben: $Y_{(k)} = Y_\infty(k \cdot \Delta\omega)$
- A valóságban: $Y_{(k)} = 1/2\pi \cdot (Y_\infty * H)(k \cdot \Delta\omega)$
- Cél lenne a DTFT spektrumot szivárgás nélkül mintavételezni: $Y_{(k)} := Y_\infty(k \cdot \Delta\omega)$

Spektrumszivárgás - ablakozás

– Tehát a megfigyelt jel DFT spektruma:

$$Y_k = 1/2\pi \cdot (Y * H)(k \cdot \Delta\omega)$$

– $h[n]$ az úgynevezett ablak függvény

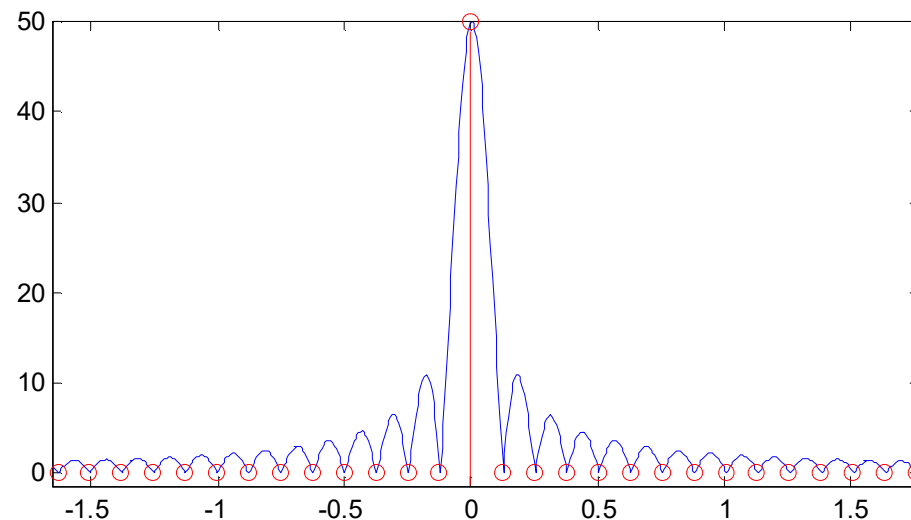
- Ha expliciten nem ablakozunk, akkor: $h[n] = \text{rect}_T[n]$

Pl.: $T = 50$

Kék görbe: rect ablak DTFT
spektrum amplitúdója

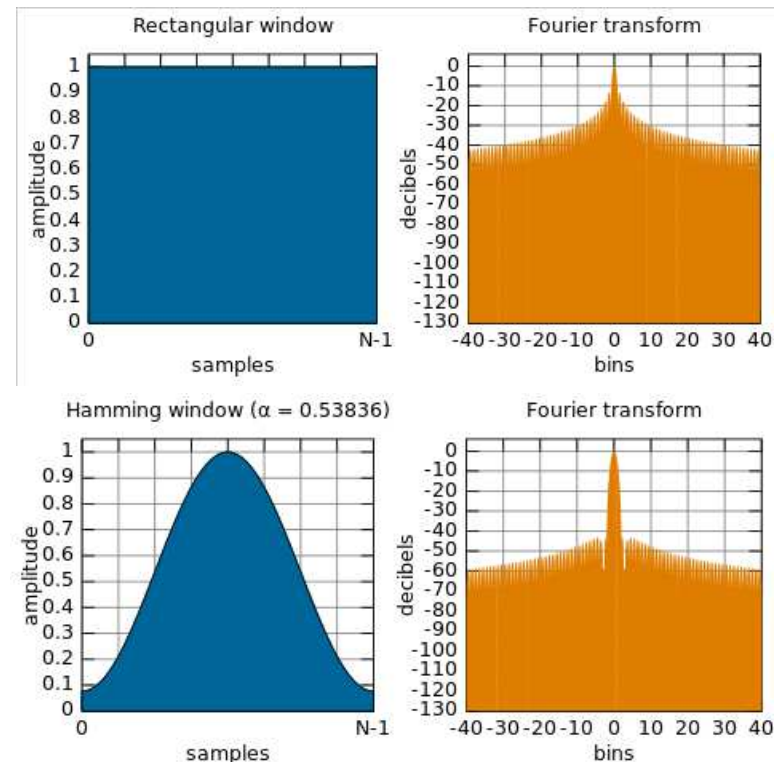
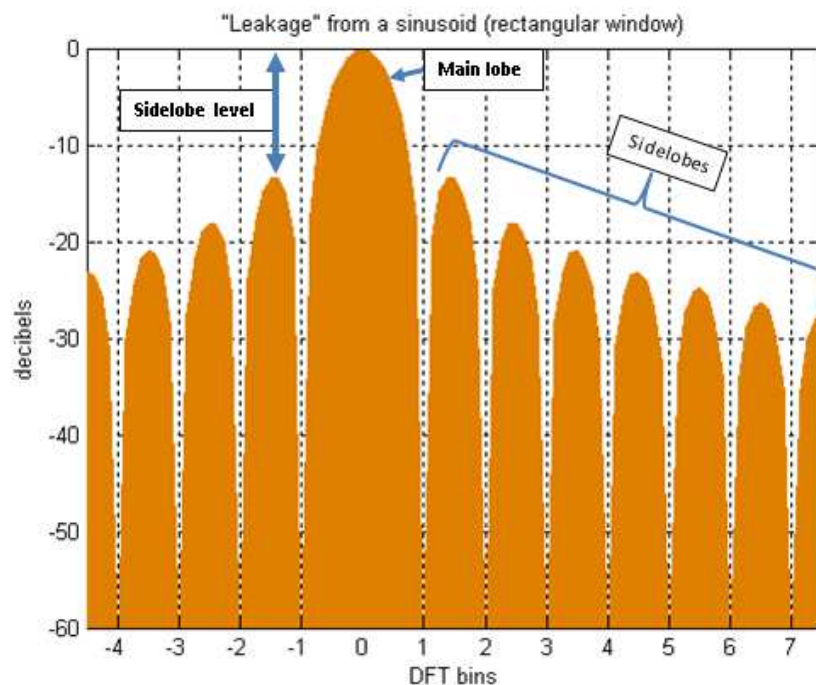
Piros pontsor: rect ablak DFT
spektrum amplitúdója

Mikor nincs spektrumszivárgás?



Spektrumszivárgás - ablakozás

- DFT előtti ablakozás:
 - Képtérben az általunk definiált $h[n]$ -el szorzunk
 - Ablakfüggvények tulajdonságai:

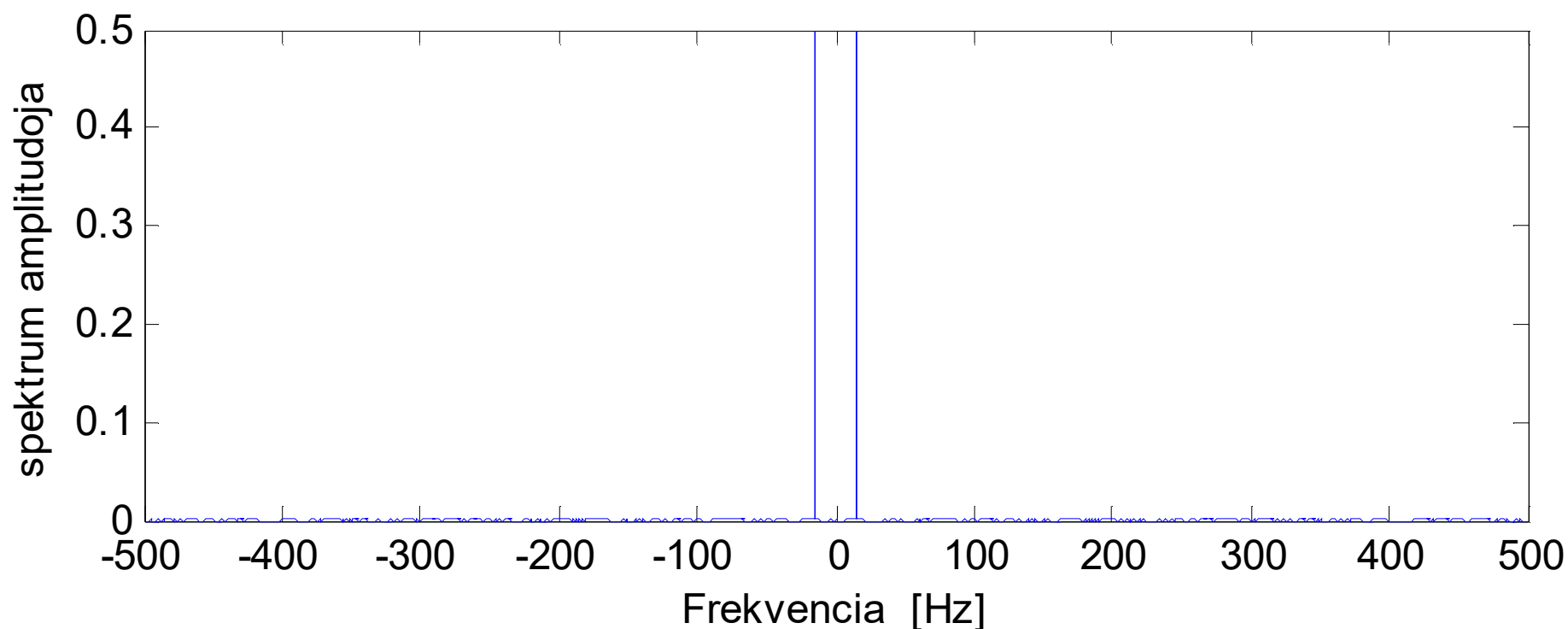


Koherens mintavételezés

- Periodikus jelből egész számú periódusnyit mintavételezünk $(y_N) : N/f_s = k/f, k \in \mathbb{Z}_+$
 - f : periodikus jelünk frekvenciája, N : minták száma
 - N pontos négyzetes ablak DTFT spektruma:
 - $H_{rect} = \sin(\omega/\Delta\omega)/(\omega/\Delta\omega)$
 - $H_{rect}(k \cdot \Delta\omega) = \delta_{k,0}$ ha $k \in \mathbb{Z}$
 - $Y_s(\omega) = 0$, ha $\omega \neq k \cdot \Delta\omega \big|_{k \in \mathbb{Z}}$
 - Tehát a DFT által mintavételezett frekvenciákon nem torzul az ablakozás miatt a DTFT spektruma
 - Különben Spektrumszivárgás.

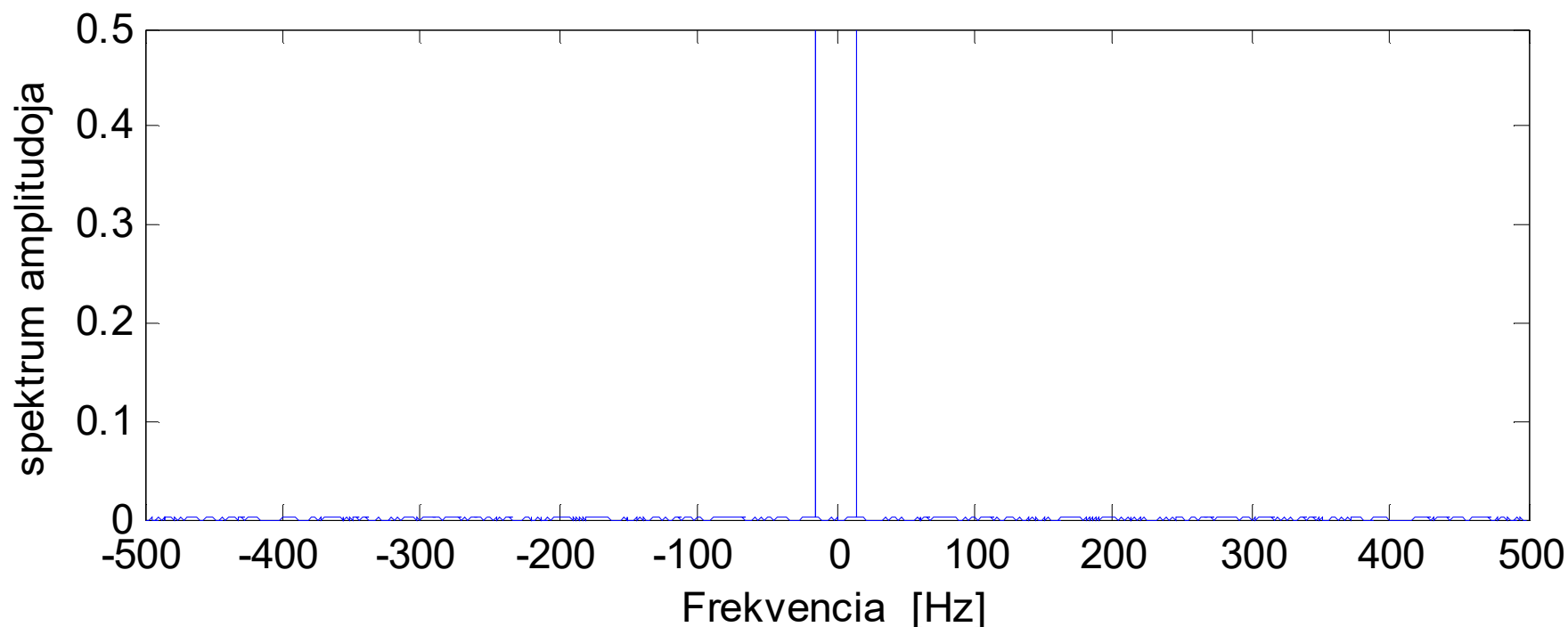
Spektrumszivárgás – nem koherens mintavételezés

- Adott folytonos jel: $y(t) = \sin(2\pi \cdot t \cdot 15)$



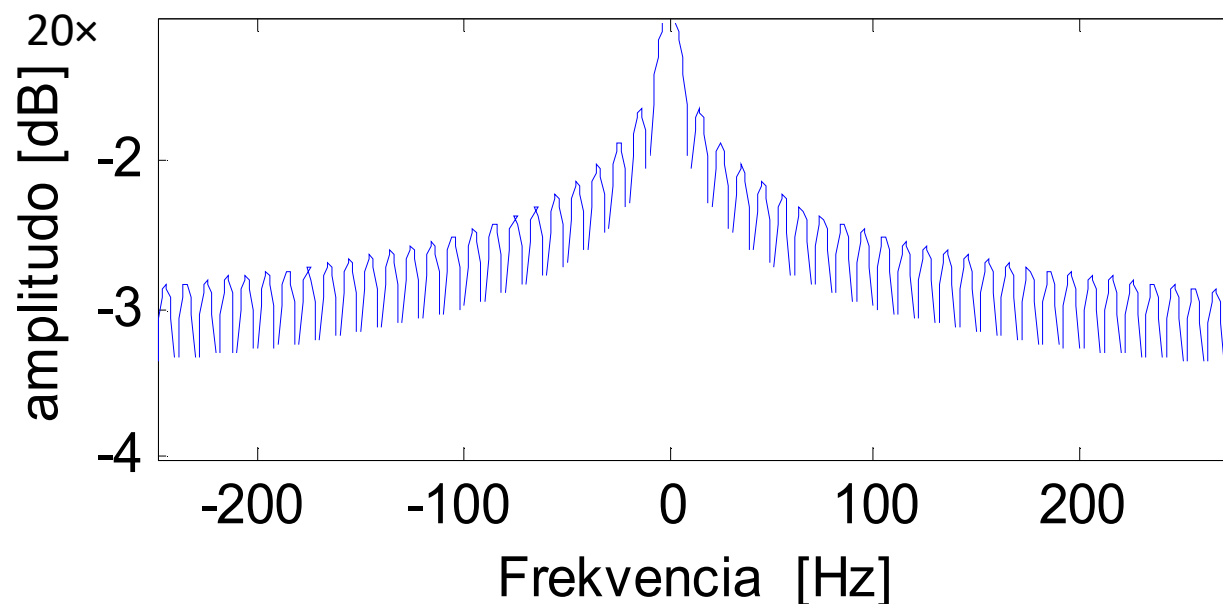
Spektrumszivárgás – nem koherens mintavételezés

- Adott folytonos jel: $y(t) = \sin(2\pi \cdot t \cdot 15)$
 - Mintavételezzük ($y_\infty[\cdot]$): $f_s = 1\text{kHz}$, $N = \infty$
 - Mivel a mintavételi törvényt nem sértjük meg:



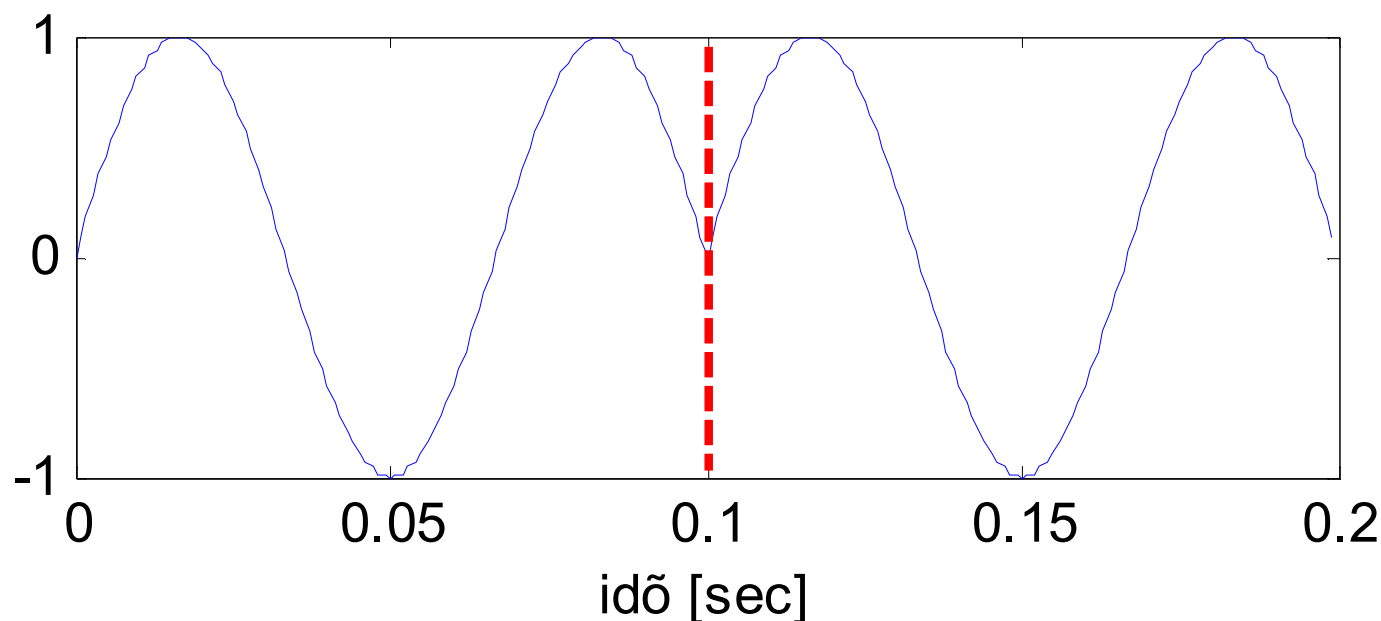
Spektrumszivárgás – nem koherens mintavételezés

- Adott folytonos jel: $y(t) = \sin(2\pi \cdot t \cdot 15)$
 - Mintavételezzük (y_{100}): $f_s = 1\text{kHz}$, $N = 100$
 - Megfigyelési ekvivalens: $(y_\infty \cdot \text{rect}_{100})[\cdot]$
 - Implicit ablak DTFT spektrumának részlete:



Spektrumszivárgás – nem koherens mintavételezés

- Adott folytonos jel: $y(t) = \sin(2\pi \cdot t \cdot 15)$
 - Mintavételezzük (y_{100}): $f_s = 1\text{kHz}$, $N = 100$
 - DFT által „látott” jel: $y_{100}[n] = (y_\infty \cdot h_{\text{Rect}})[\text{mod}_{100}(n)]$

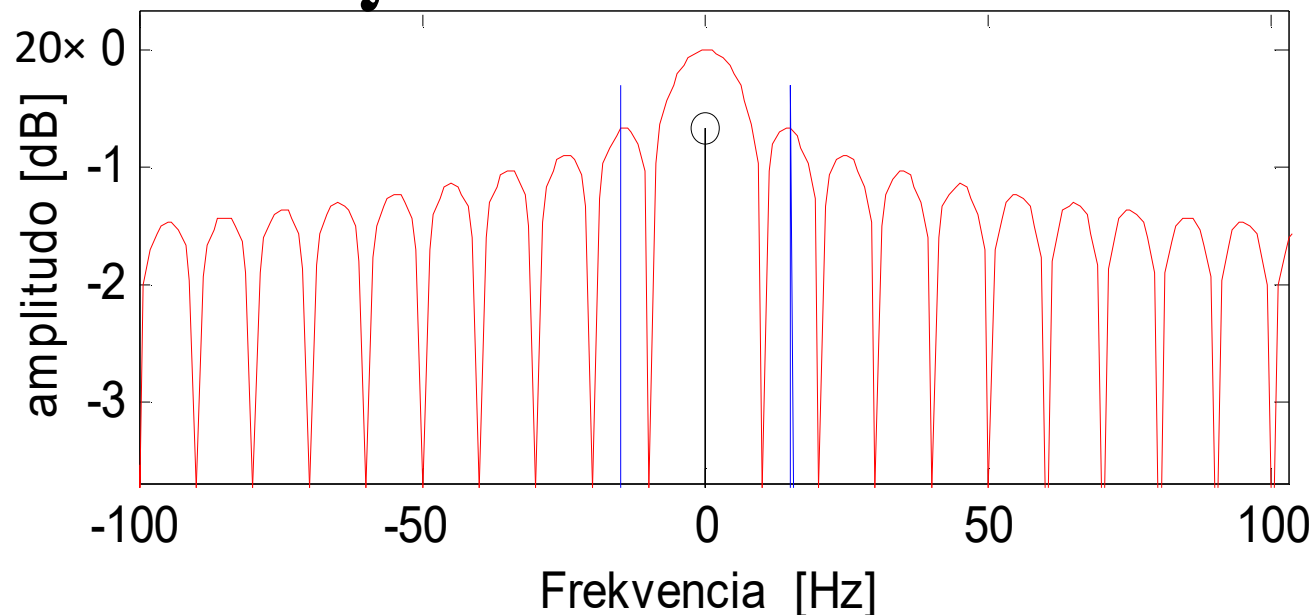


Spektrumszivárgás – nem koherens mintavételezés

- Adott folytonos jel: $y(t) = \sin(2\pi \cdot t \cdot 15)$
 - Mintavételezzük (y_{100}): $f_s = 1\text{kHz}$, $N = 100$
 - Megfigyelési ekvivalens spektruma: $Y_{100} \propto Y_\infty * H_{rect}$

$$Y_{100}(0) = \int Y_\infty(\tau) \cdot \frac{1}{2\pi} H_{rect}(0 - \tau) d\tau$$

Piros: ablak normált spektruma

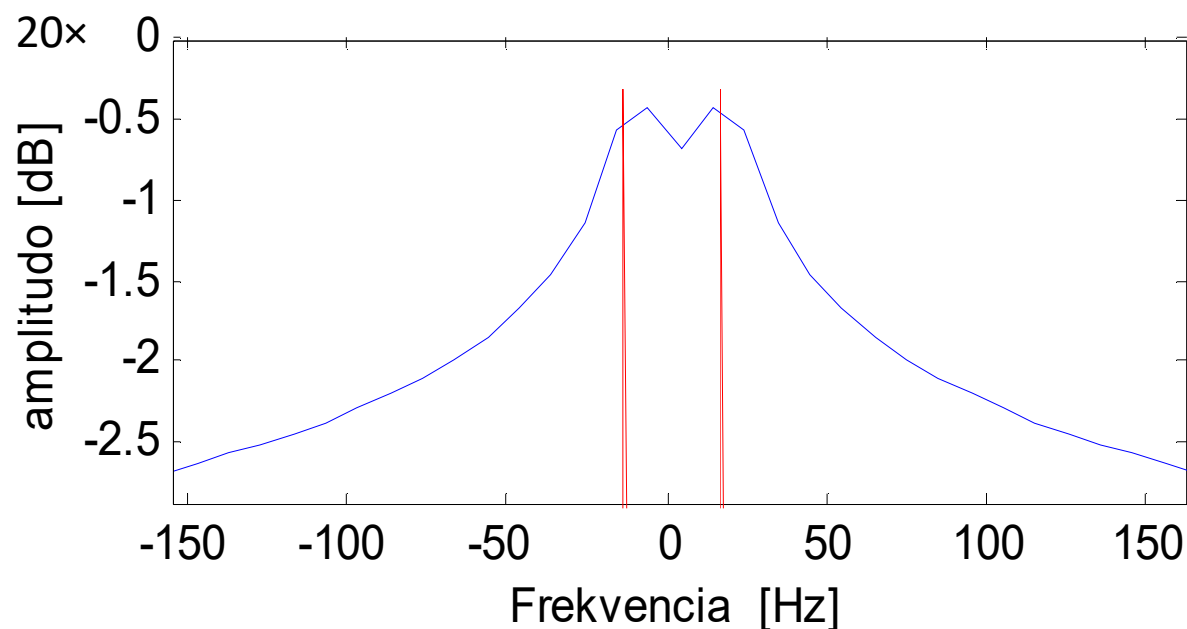


Kék: folytonos jel spektruma

Fekete: $N=100$
mintavétellel előálló
jel spektrumának DC
komponense

Spektrumszivárgás – nem koherens mintavételezés

- Adott folytonos jel: $y(t) = \sin(2\pi \cdot t \cdot 15)$
 - Mintavételezzük (y_{100}): $f_s = 1\text{kHz}$, $N = 100$
 - Megfigyelési ekvivalens spektruma: $Y_{100} \propto Y_\infty * H_{rect}$

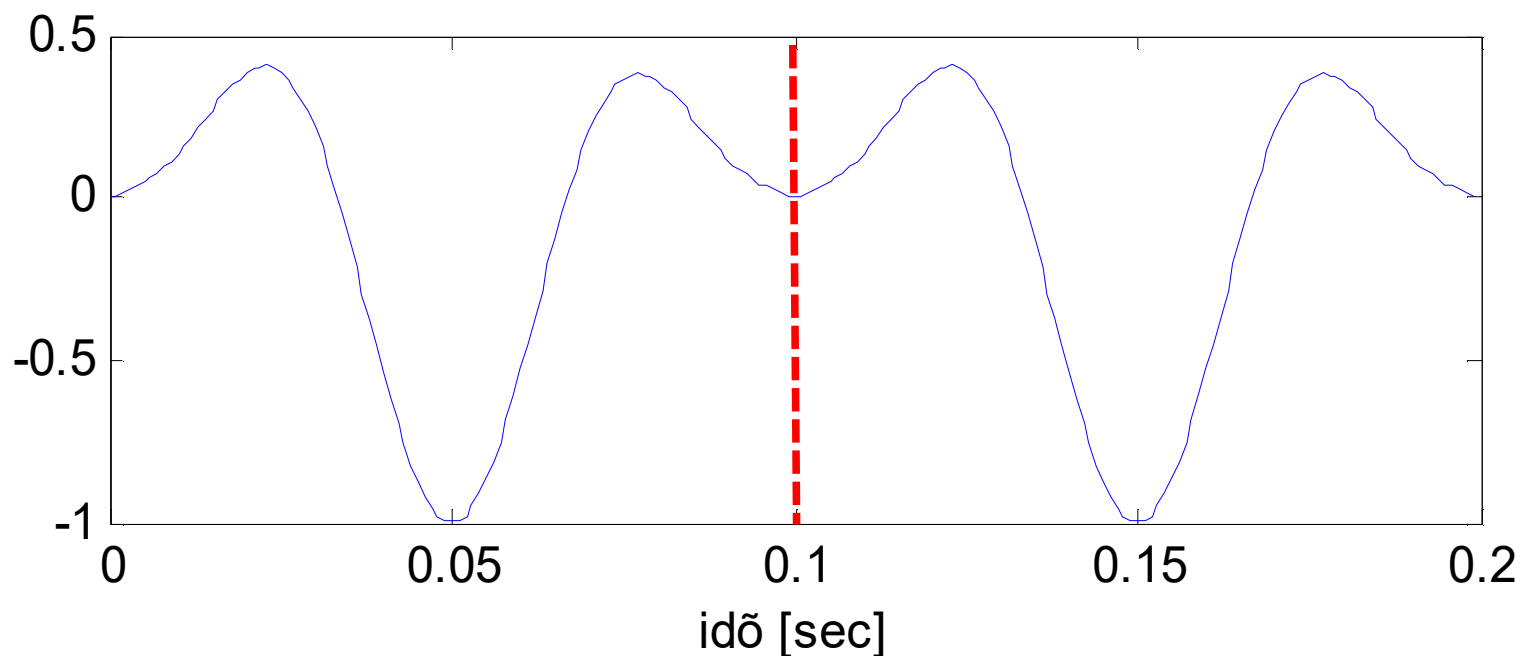


Piros: folytonos jel
spektruma

Kék: $N=100$
mintavétellel előálló
jel spektruma

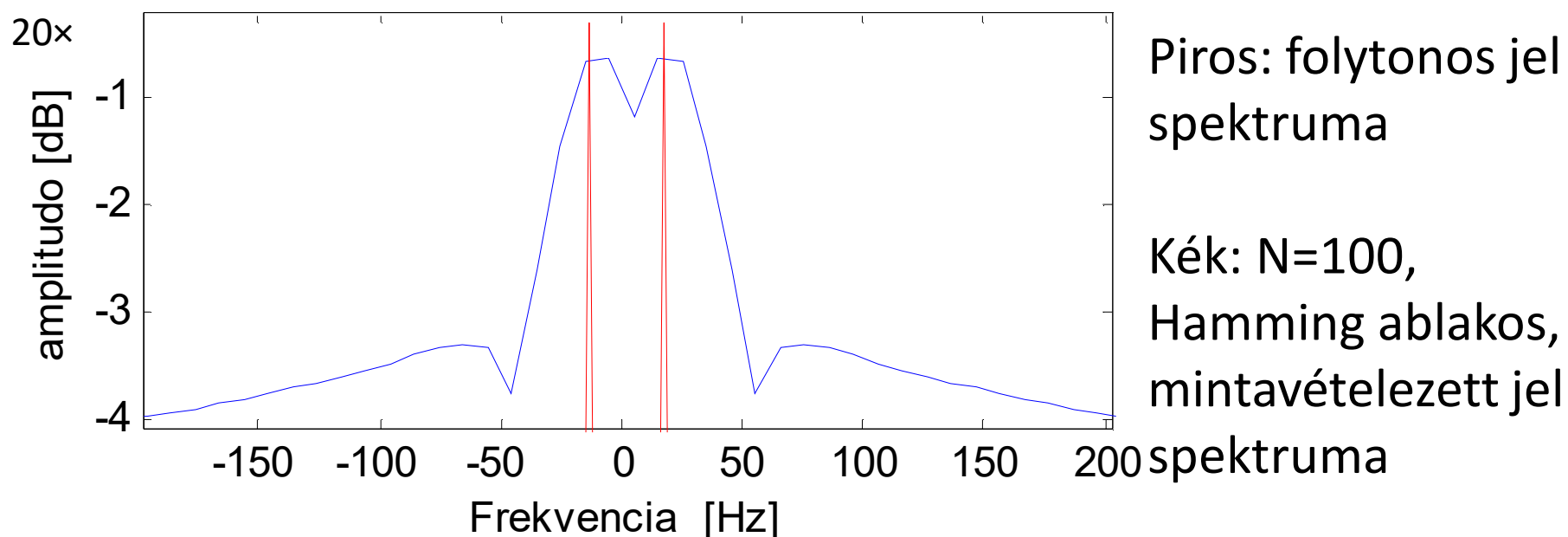
Spektrumszivárgás – nem koherens mintavételezés, Hamming ablak

- Adott folytonos jel: $y(t) = \sin(2\pi \cdot t \cdot 15)$
 - Mintavételezzük (y_{100}): $f_s = 1\text{kHz}$, $N = 100$
 - DFT által „látott” jel: $y_{100}[n] = (y_\infty \cdot h_{Ham})[\text{mod}_{100}(n)]$



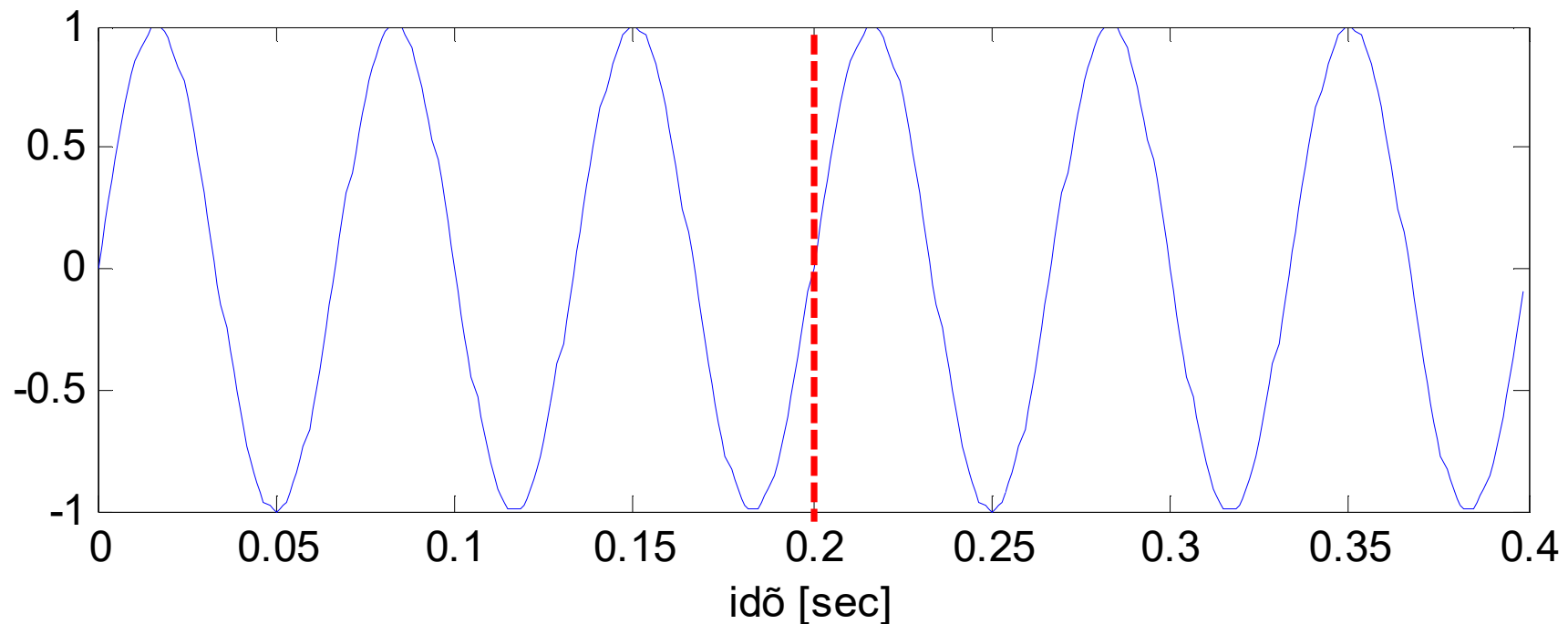
Spektrumszivárgás – nem koherens mintavételezés, Hamming ablak

- Adott folytonos jel: $y(t) = \sin(2\pi \cdot t \cdot 15)$
 - Mintavételezzük (y_{100}): $f_s = 1\text{kHz}$, $N = 100$
 - Megfigyelési ekvivalens spektruma: $Y_{100} \propto Y_\infty * H_{Ham}$



Koherens mintavételezés

- Adott folytonos jel: $y(t) = \sin(2\pi \cdot t \cdot 15)$
 - Koherensen mintavételezzük (y_{200}): $f_s = 1\text{kHz}$, $N = 200$
 - DFT által „látott” jel: $y_{200}[n] = y_\infty[\text{mod}_{200}(n)] = y_\infty[n]$

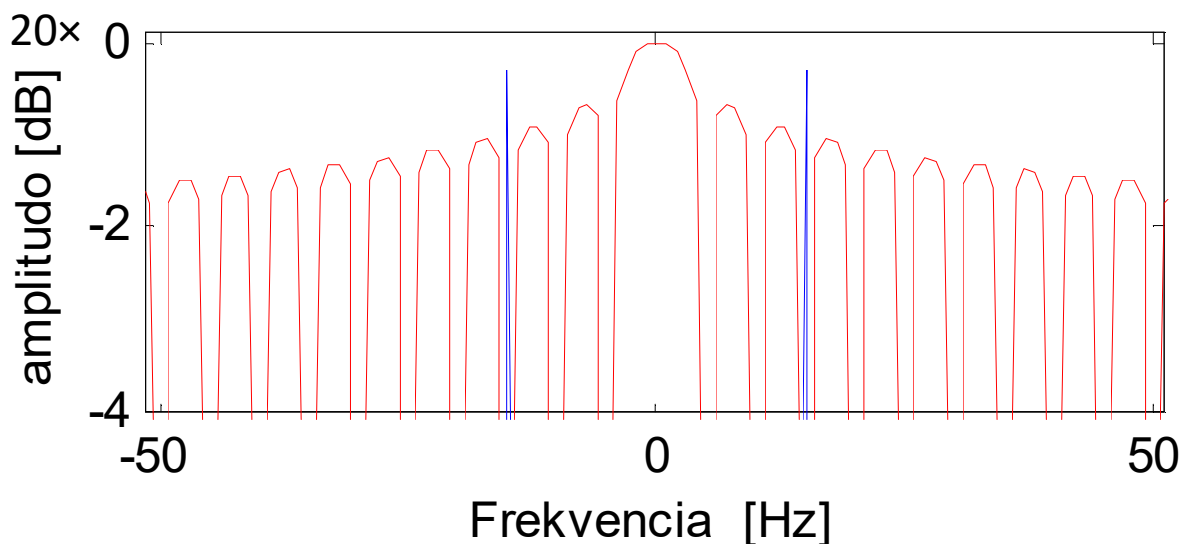


Spektrum koherens mintavételezés esetén

- Adott folytonos jel: $y(t) = \sin(2\pi \cdot t \cdot 15)$
 - Mintavételezzük (y_{200}): $f_s = 1\text{kHz}$, $N = 200$
 - Megfigyelési ekvivalens spektruma: $Y_{200} \propto Y_{\infty} * H_{rect}$

$$Y_{200}(0) = \int Y_{\infty}(\tau) \cdot \frac{1}{2\pi} H_{rect}(0 - \tau) d\tau$$

Piros: ablak normált spektruma

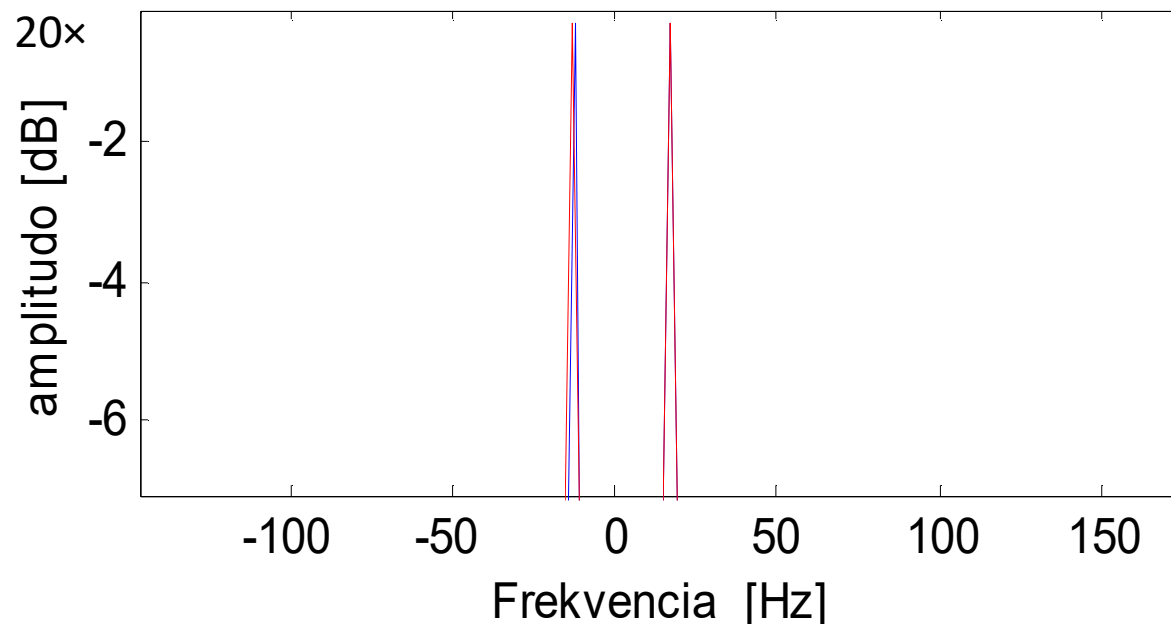


Kék: folytonos jel spektruma

Fekete: $N=200$ mintavétellel előálló jel spektrumának DC komponense ($\log(0)$)

Spektrum koherens mintavételezés esetén

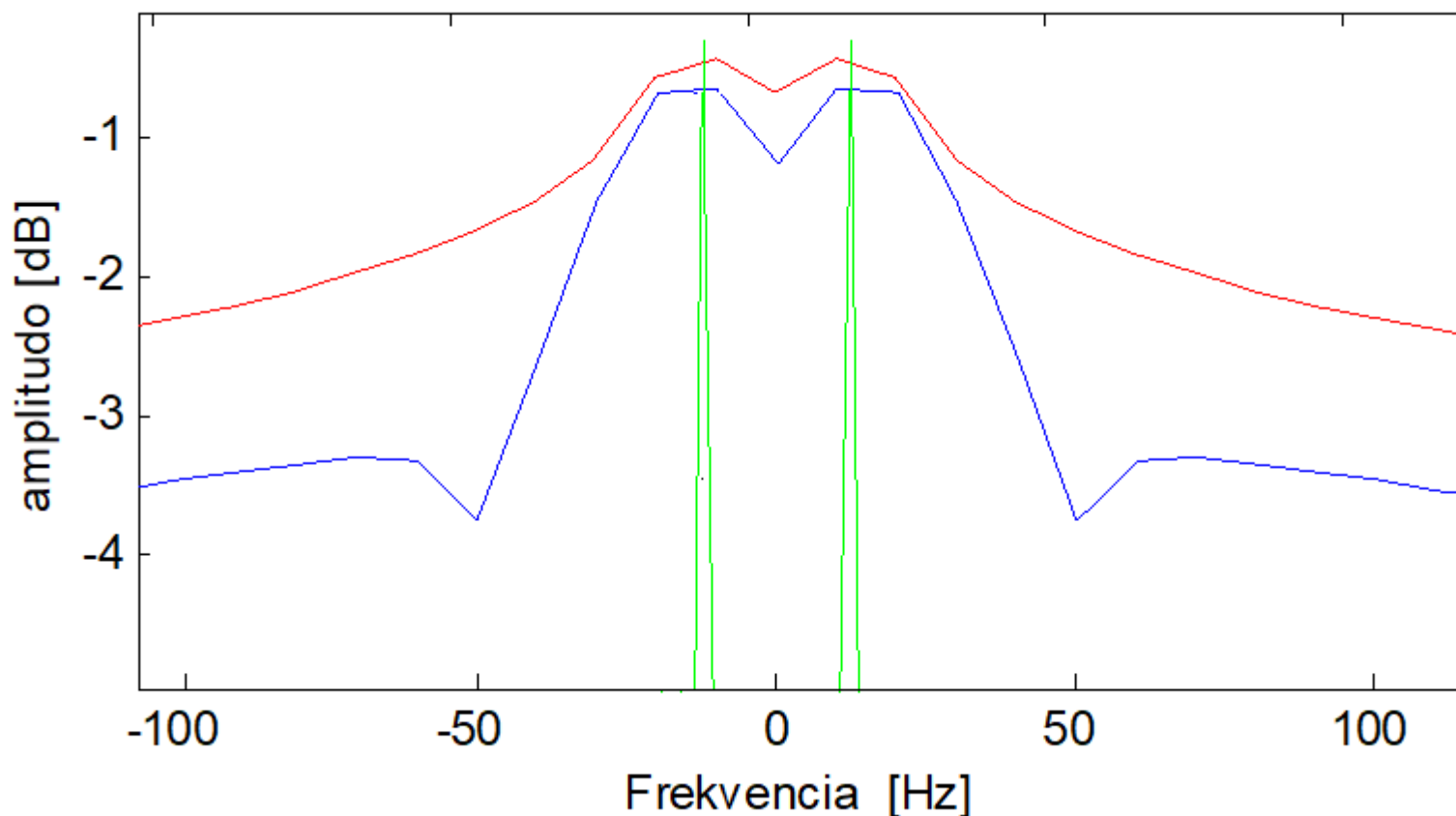
- Adott folytonos jel: $y(t) = \sin(2\pi \cdot t \cdot 15)$
 - Koherensen mintavételezzük (y_{200}): $f_s = 1\text{kHz}$, $N = 200$
 - Megfigyelési ekvivalens spektruma: $Y_{200} \propto Y_\infty * H_{rect}$



Piros: folytonos jel
spektruma

Kék: $N=200$
mintavétellel előálló
jel spektruma

Koherensen mintavett / ablakozott, nem koherensen mintavett jelek spektruma



Zöld: koherensen mintavételezett jel spektruma, kék: Hamming ablakos, piros: téglalap ablakos spektrum

2D DFT

Többi transzformáció esetén is hasonló a többdimenziós eset

- Analízis irány:

$$\begin{aligned} F_{u,v} &= \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f[m,n] \exp\{-2\pi j \cdot (u \cdot m/M + v \cdot n/N)\} = \\ &= \sum_{m=0}^{M-1} \left(\sum_{n=0}^{N-1} f[m,n] \cdot \exp\{-2\pi j \cdot (v \cdot n/N)\} \right) \exp\{-2\pi j \cdot (u \cdot m/M)\} \end{aligned}$$

- Tulajdonságok:

- Periodikus: $[M,N]$ szerint

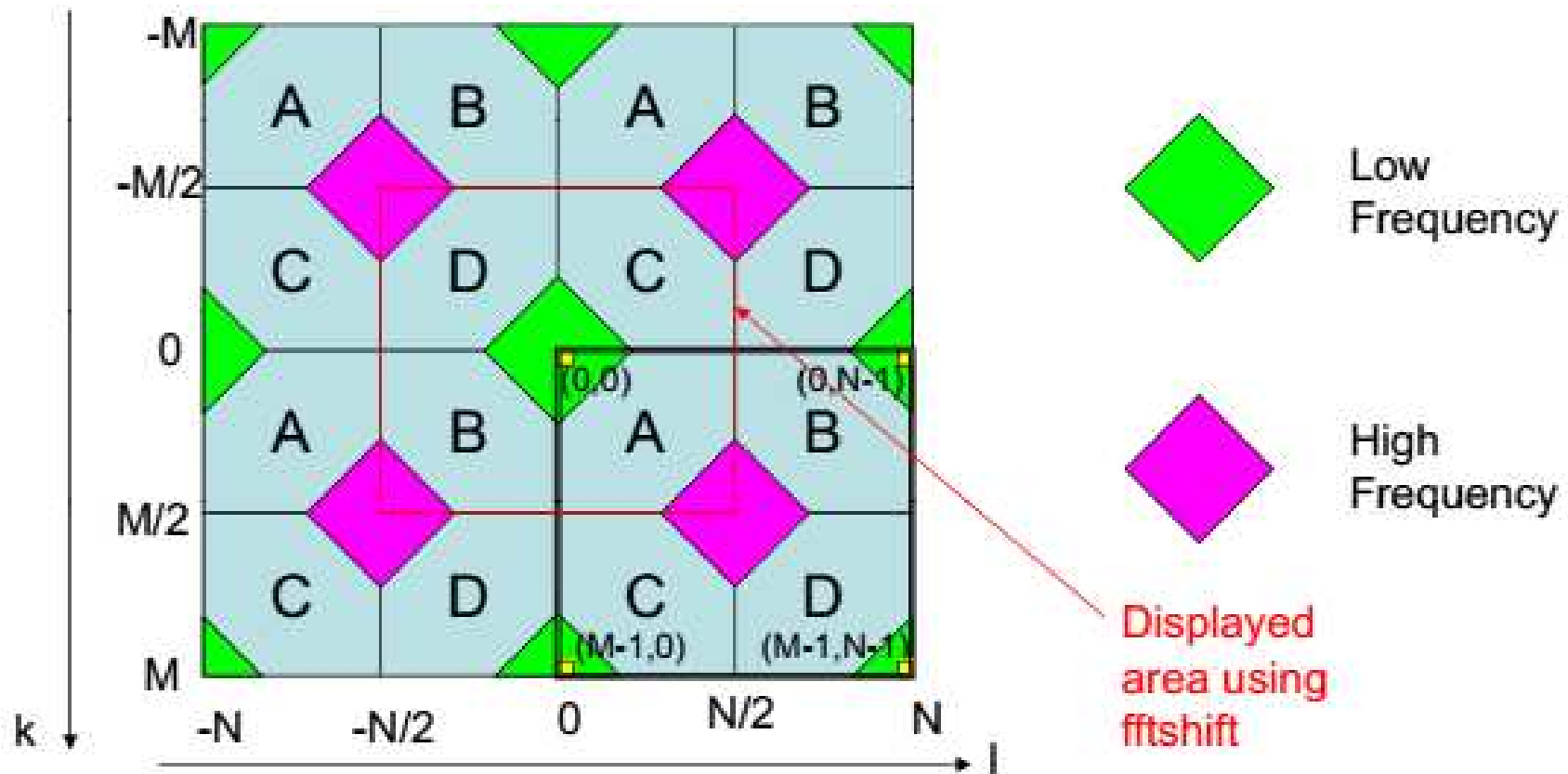
- Valós jel esetén: $F_{u,v} = \overline{F_{-u,-v}} = \overline{F_{M-u,N-v}}$

- Ha M, N páros: $F_{M/2+u,N/2+v} = \overline{F_{M/2-u,N/2-v}}$

- Spektrum hullámfrontos interpretációja

2D DFT spektrum

- Spektrum blokkjai:



2D DFT spektrum gépi ábrázolása

- Konjugált szimmetria valós jelek esetén:

0	1	2	3	4	3	2	1
5	6	7	8	9	33	32	31
10	11	12	13	14	30	29	28
15	16	17	18	19	27	26	25
20	21	22	23	24	23	22	21
15	25	26	27	19	18	17	16
10	28	29	30	14	13	12	11
5	31	32	33	9	8	7	6

M=N=8

 real x x Conjugate pairs

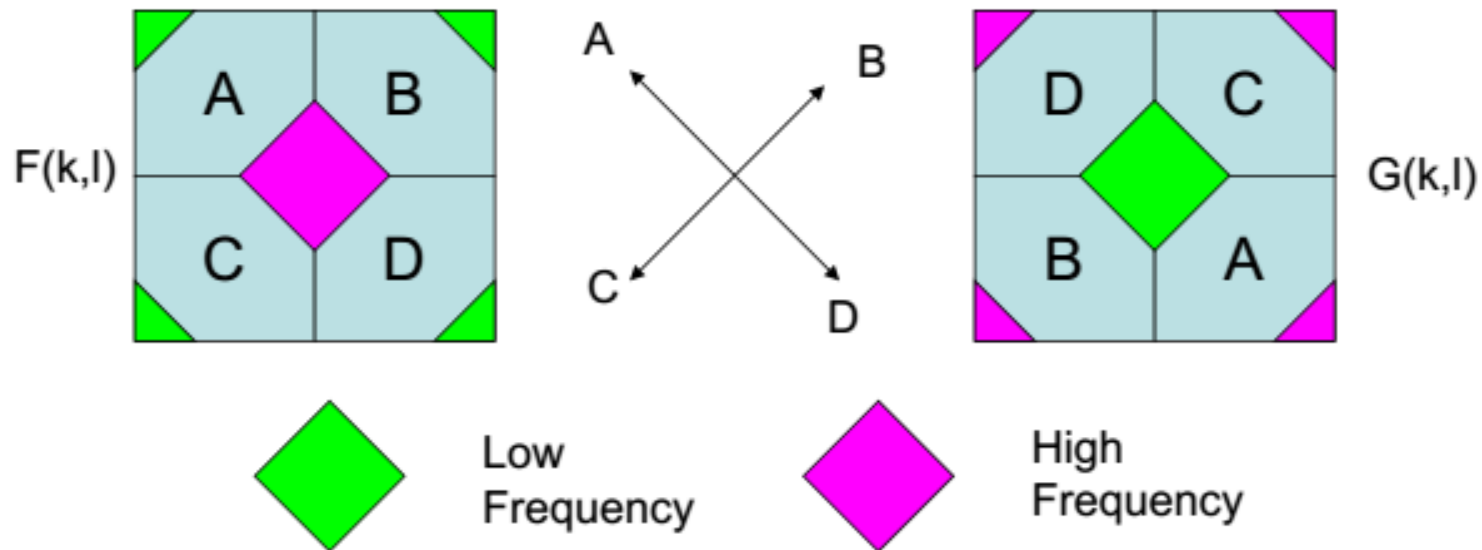
 Nyquist frekvenciához tartozó komponens

0	1	2	3	4	4	3	2	1
5	6	7	8	9	40	39	38	37
10	11	12	13	14	36	35	34	33
15	16	17	18	19	32	31	30	29
20	21	22	23	24	28	27	26	25
20	25	26	27	28	24	23	22	21
15	29	30	31	32	19	18	17	16
10	33	34	35	36	14	13	12	11
5	37	38	39	40	9	8	7	6

M=N=9

2D DFT spektrum

- Általában a DC komponenst „csavarjuk” középre:
 - Ampl. moduláció: $g[m,n] = f[m,n] \cdot (-1)^{(m+n)}$

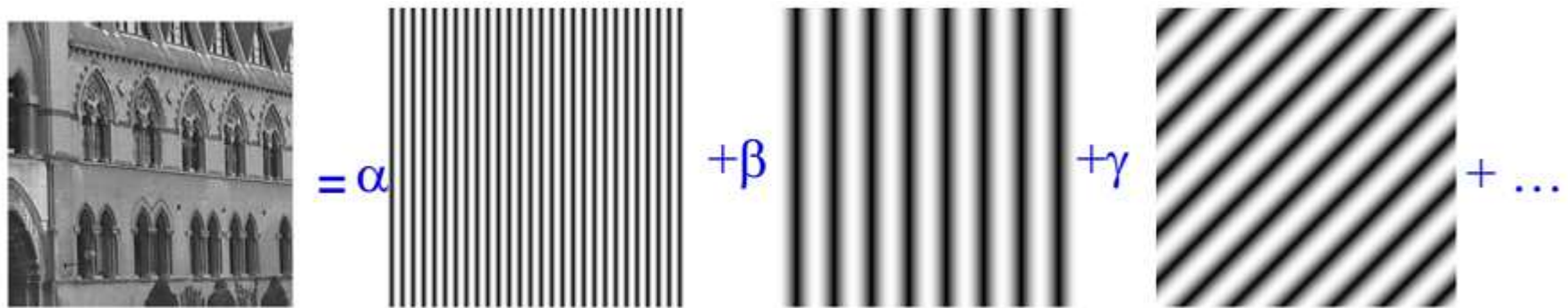


2D DFT Számolási tulajdonságok

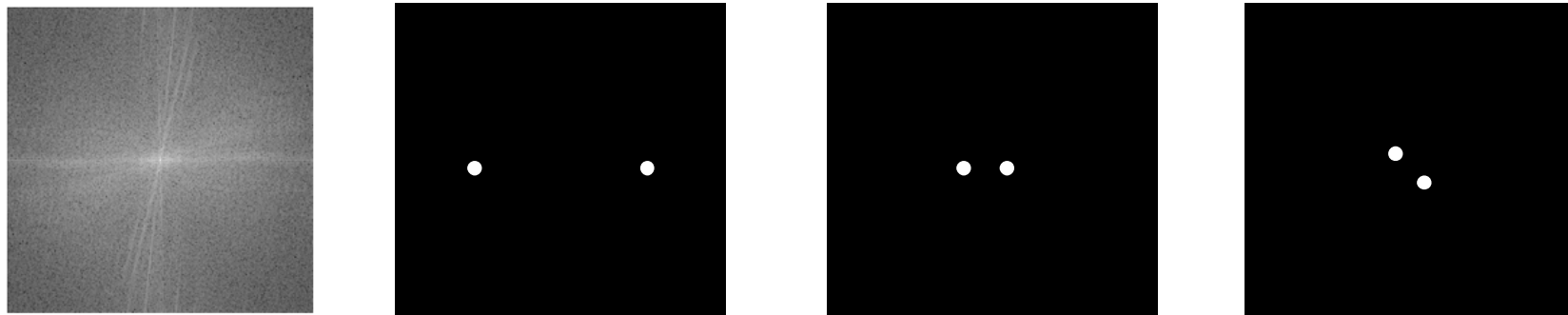
- 1D DFT komplexitása:
 - Direkt módszer: $O(N^2)$
 - FFT: $O(N \times \log(N))$, hatékonyan számítható, ha N 2 hatvány (radix-2 Cooley-Tukey)
- 2D DFT komplexitása ($N \times N$ -es képre):
 - Direkt számítás: $O(N^4)$
 - Szeparálással: $O(N^3)$
 - Szeparálás + FFT: $O(N^2 \times \log(N))$
- Half Complex ábrázolással helyben tárolható!

2D DFT Vizuális értelmezés

- Lényegében egy bázis transzformáció
ortogonális bázisokra (szinuszos hullámok)

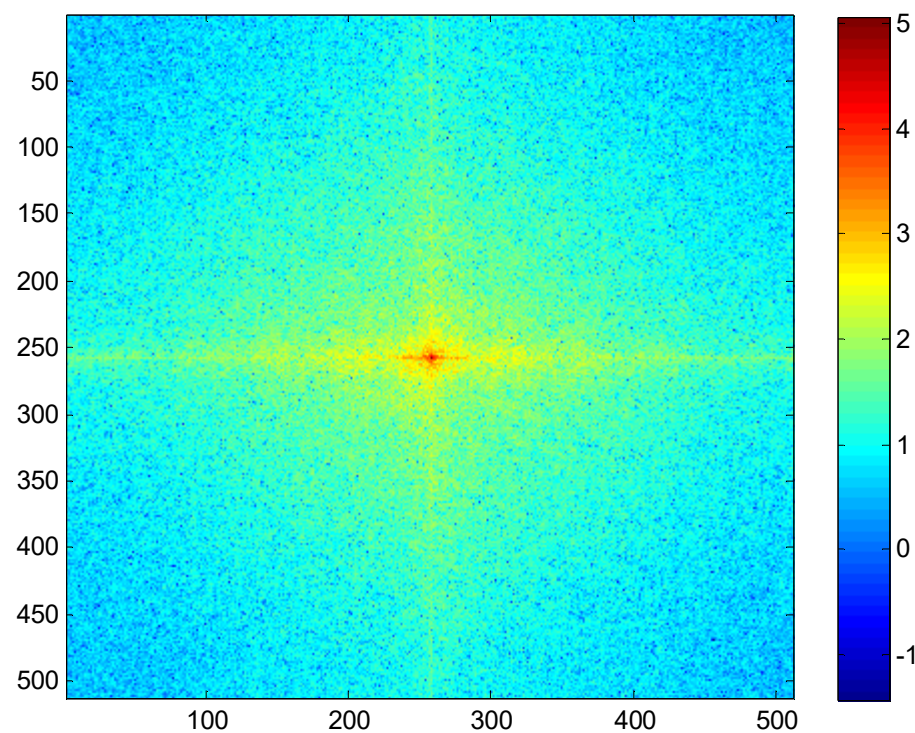


Spektrum amplitudója:



Képek spektrumának jellemzői

- Alacsony frekvenciákon nagy energia:



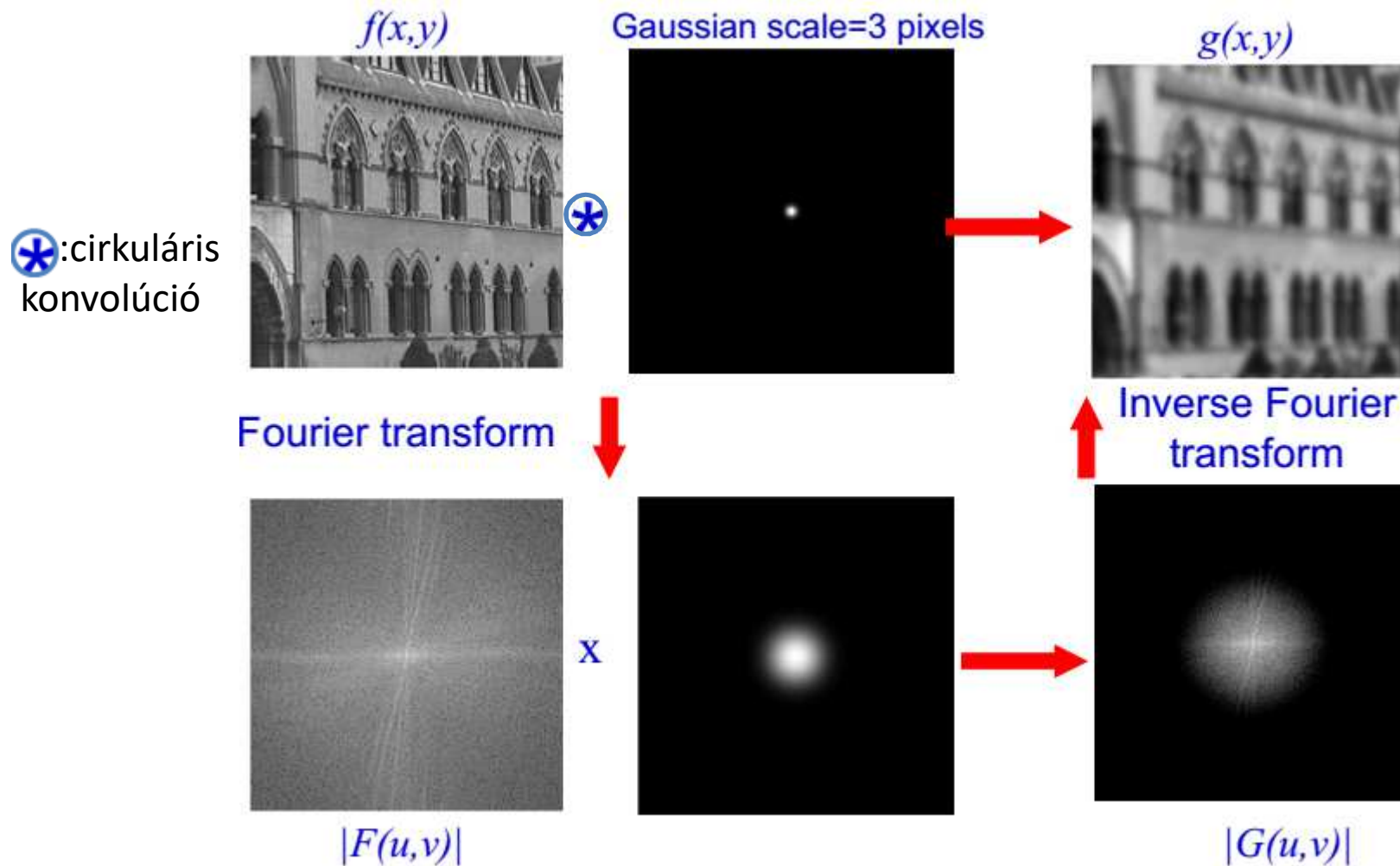
Spektrum amplitúdója logaritmikus skálán

2D DFT konvolúciós tétele:

- DFS- es analógia – cirkularitás:
 - $(f \otimes g)[n] = \sum_{m=0}^N f[m] \cdot g[\text{mod}_N(n-m)] = (f' * g')[n]$
 - $f'[n] = f[\text{mod}_N(n)]$, míg $g'[m] = g[\text{mod}_N(m)]$
- Mit tegyünk, ha $f * g$ -t akarjuk DFT-vel számolni?
 - Terjesszük ki f és g méretét $[N+M]$ hosszúra:
 - Ezt időtartomány / síktartományban is meg kell tenni
 - Általános módszerek: 0-val paddelés, kép széleire tükrözés, alul-áteresztő szűréseknél súlyozás, kiterjesztés a kép szélső pixelének intenzitásával, stb.
 - 5×5-ös kernel esetén már gyorsabb

Konvolúció tétel fontossága

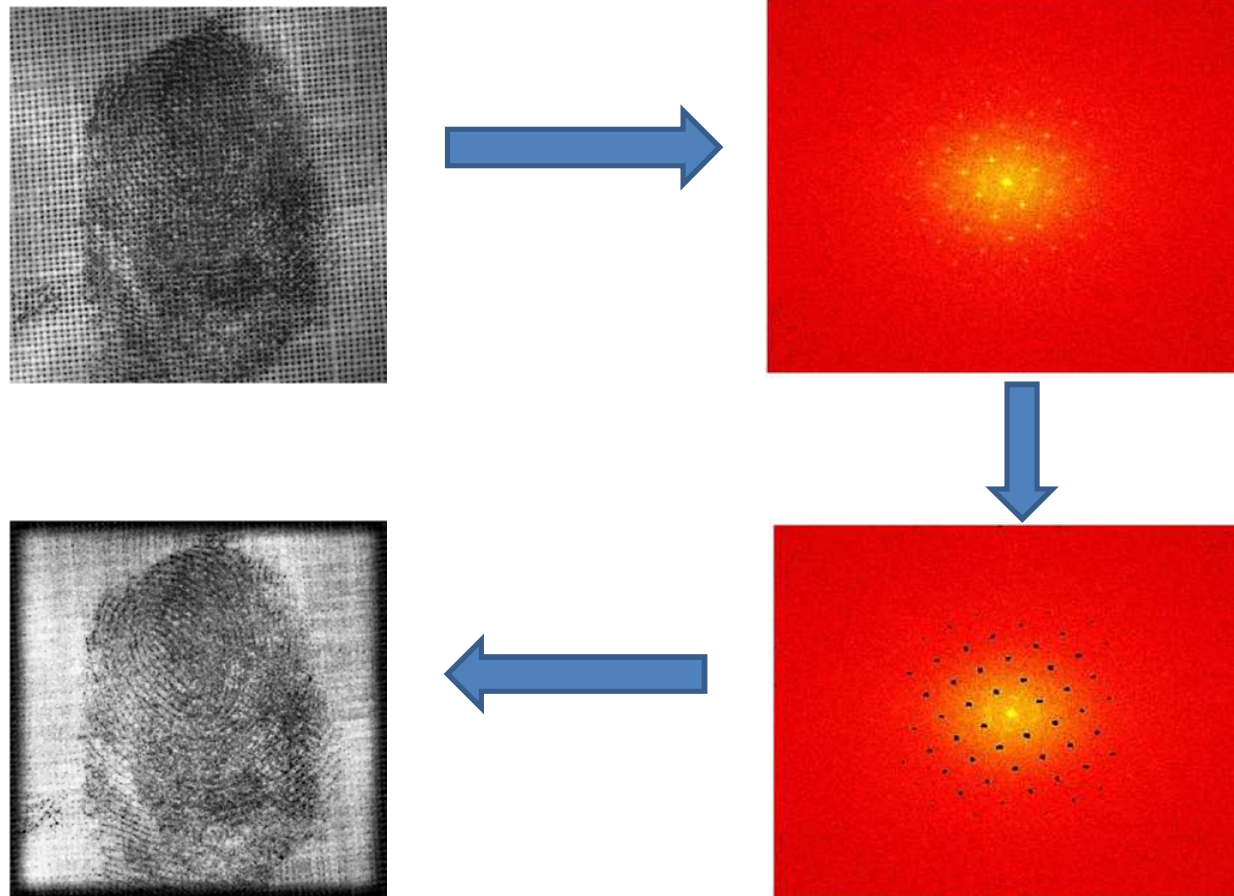
- Lineáris szűrések frekvenciatérben:



2D DFT Példa – periodikus textúra

ampl. moduláció

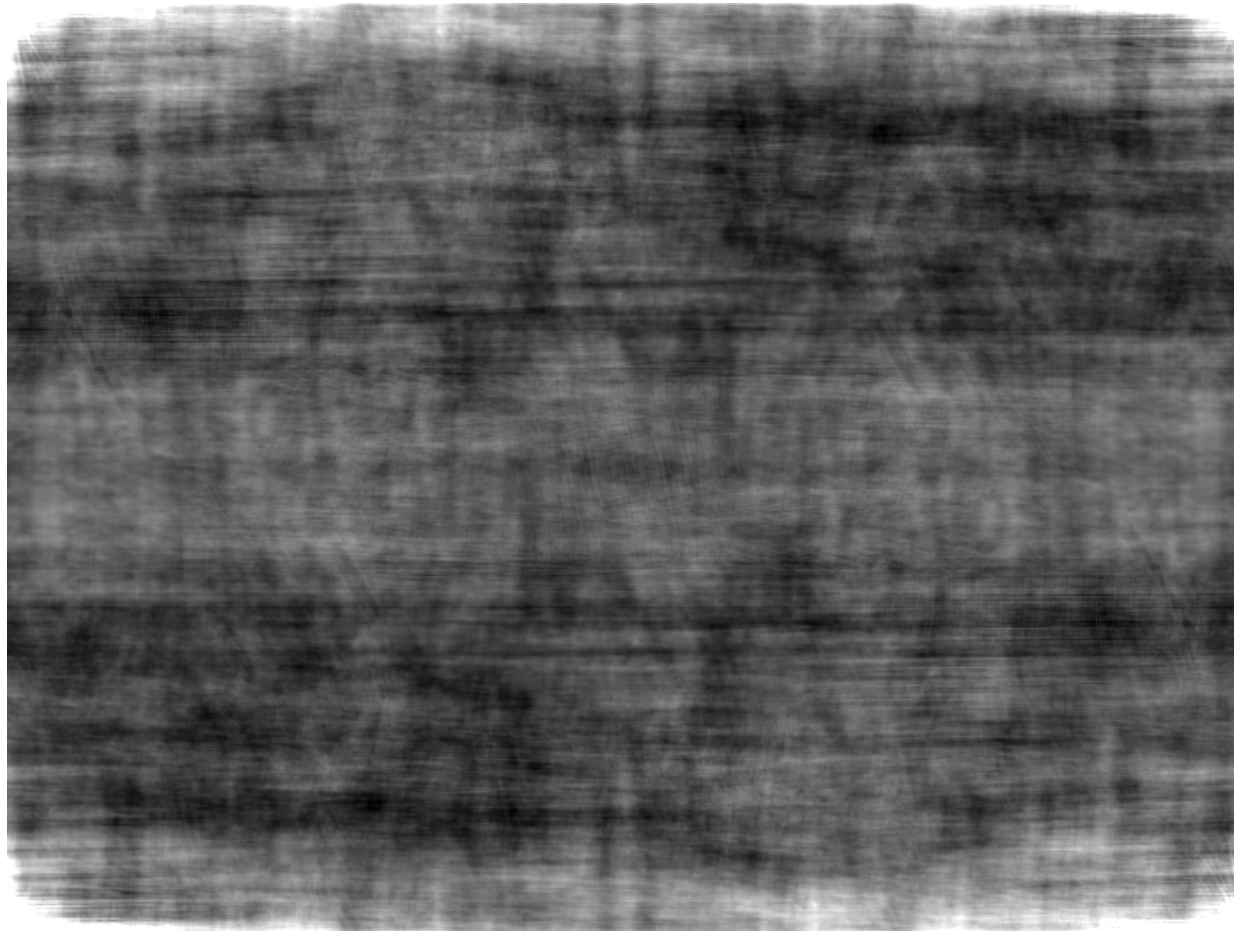
- Periodikus mintázat $\Leftrightarrow$ csúcsok a spektrumban:



2D DFT példa – rekonstrukció spektrum amplitúdóból és fázisból



2D DFT példa – spektrum
amplitúdójából rekonstruált kép



2D DFT példa – spektrum fázisából rekonstruált kép

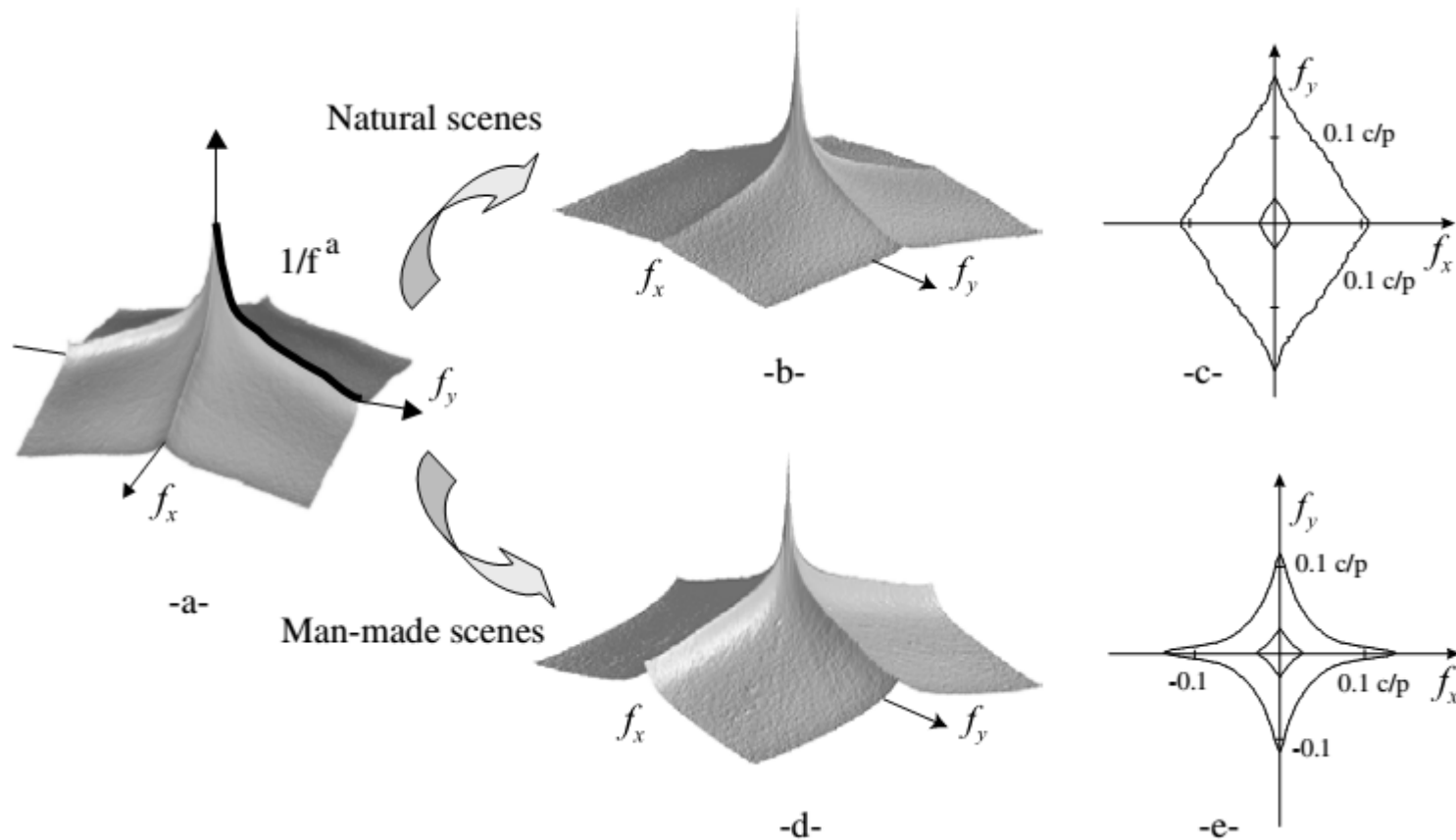


Polár koordinátás DFT

- Motiváció:
 - Radon transzformáció és annak invertálása
 - Regisztráció: elforgatás és eltolás könnyen számolhatóvá válik
- Számítása – folytonos eset:
 - $F\{\theta, \rho\} = \iint_{x,y} f(x, y) \cdot \exp\left(-2\pi j \cdot \rho \cdot (x \cdot \cos(\theta) + y \cdot \sin(\theta))\right) dy dx$
 - Nem szeparábilis
 - Fourier vetítősík tétel
 - Spektrum vonal profiljai $\Leftrightarrow$ Radon transzformáció 1D Fourier transzformáltjai

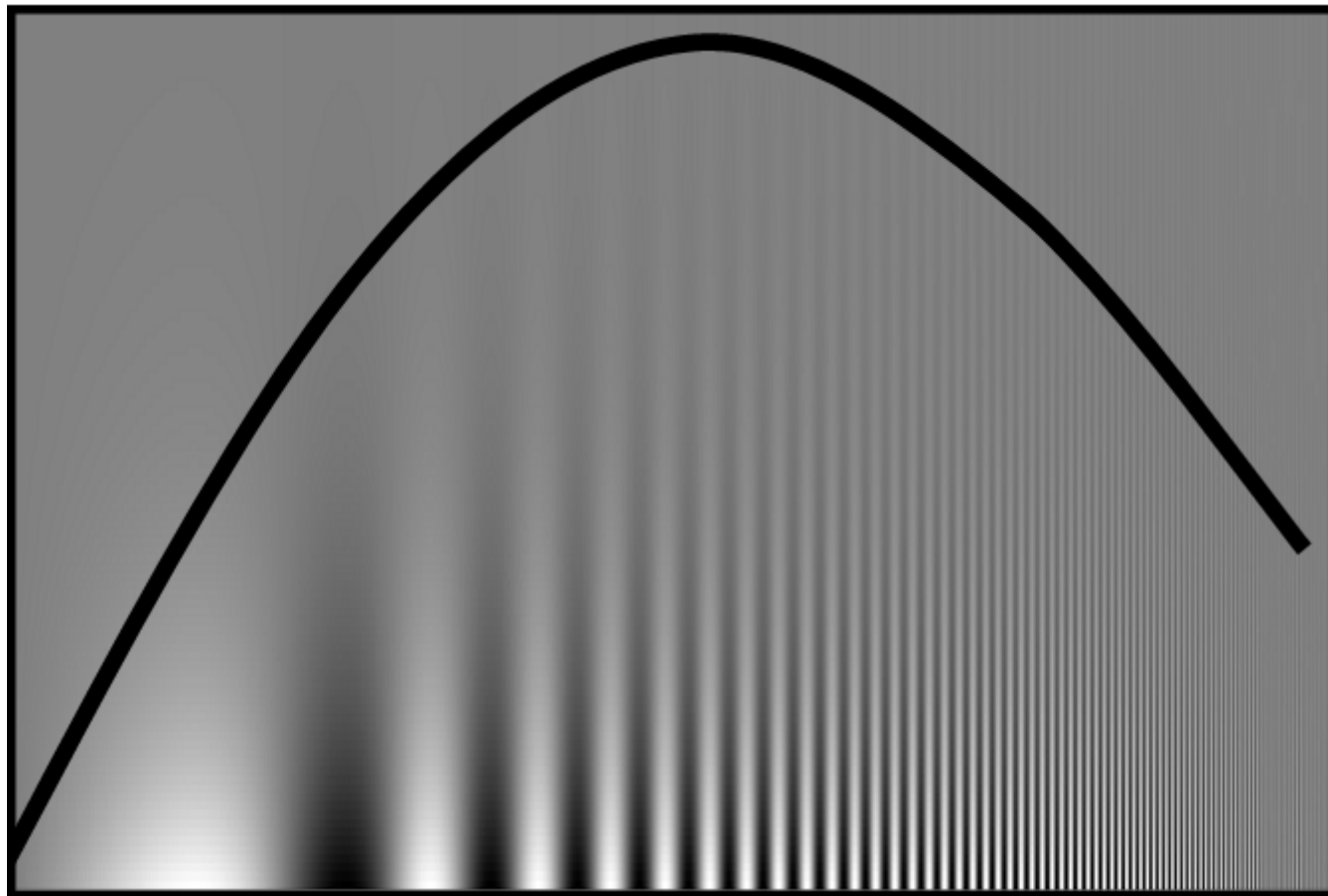
Majd a rekonstrukciónál
bizonyítjuk is!

Digitális képek átlagos energiaspektruma

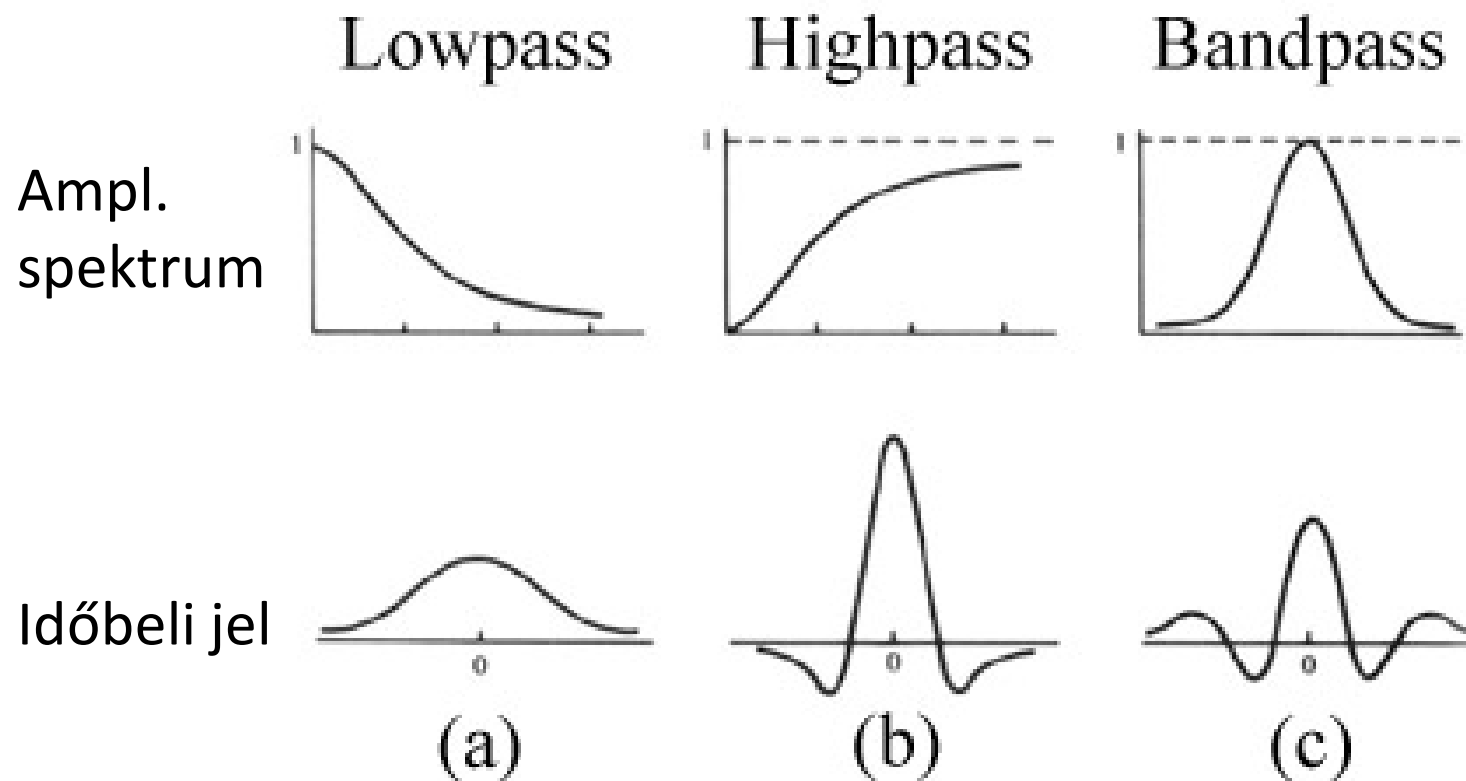


Frekvenciatartomány és emberi látás

- Campbell-Robson kontraszt érzékenységi görbe:

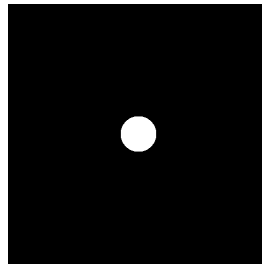


Szűrők idő és frekvencia tartományban



Ideális szűrők

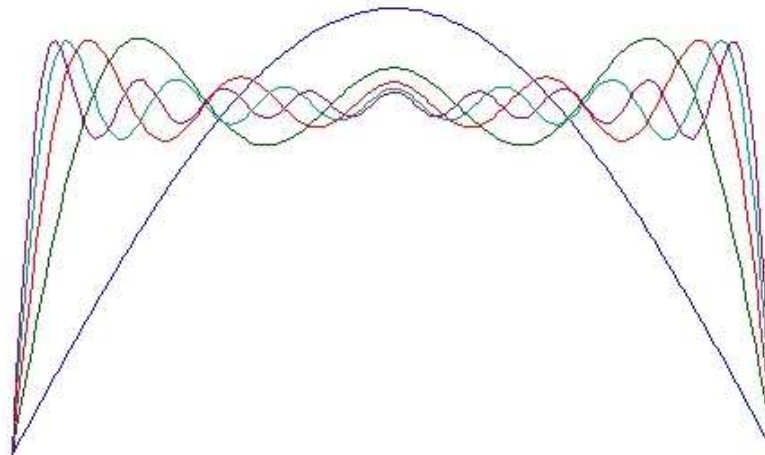
- Amplitúdó éles vágásánál Gibbs jelenség:



Gibbs gyűrű effektus

- Gibbs jelenség elkerülhető „sima” átmenetű szűrőkkel:
 - Butterworth szűrő: adott sávkorlát mellett a legsimább ampl. spektrumú lineáris szűrő
 - Gauss szűrő: alkalmazásával nincs Gibbs artefekt

Reconstruction of the periodic square waveform with 1, 3, 5, 7, 9 sinusoids



Gibbs gyűrű effektus

