2007. 09. 10. hétfő   I. Gyakorlat (1. hét)

ZH: külön külön 40%

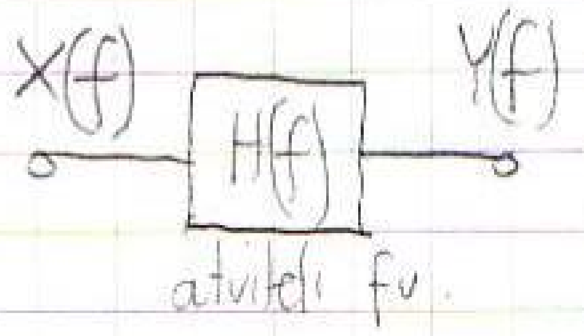
VIZSGA: 50%-os ZH súly, min 40%

$x(t)$ — jel

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^2(t)\,dt < +\infty$$ véges energiájú jel

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\, e^{-j2\pi f t}\, dt$$ a jel spektruma (Fourier trafó)

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)\, e^{j2\pi f t}\, df$$ inverz Fourier-trafó



$$Y(f) = X(f)\cdot \underbrace{H(f)}_{\text{súlyfv spektruma}}$$

$$y(t) = x(t) * h(t)$$ (konv)

egyenszint

$$m_x = \lim_{\substack{t_1 \to +\infty \\ t_2 \to -\infty}} \frac{1}{t_1 - t_2} \int_{t_2}^{t_1} x(t)\,dt$$

teljesítmény

$$S_x = \lim_{\substack{t_1 \to +\infty \\ t_2 \to -\infty}} \frac{1}{t_1 - t_2} \int_{t_2}^{t_1} x^2(t)\,dt$$

effektív érték

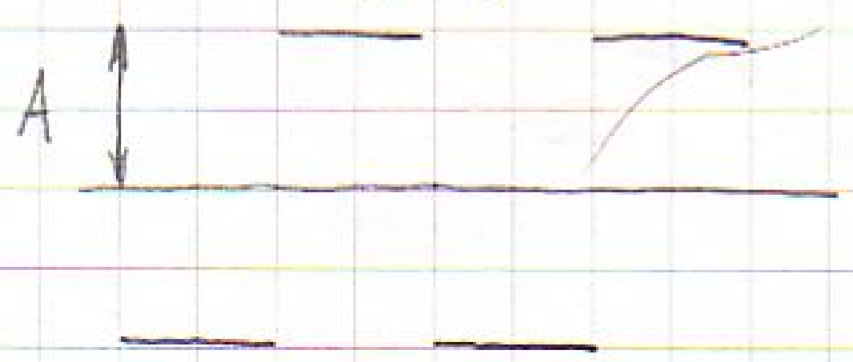
$$\sigma_{eff} = \sqrt{S_x}$$

csúcstényező

$$\frac{\text{csúcsérték}}{\text{effektív érték}}$$

példa (1) szinusjel és a szimm négyszögjel csúcstényezője

$$\sin^2 x = \frac{1-\cos 2x}{2}$$



csúcs	A	A
átl telj	$\frac{1}{2}A^2$	A^2
eff érték	$A/\sqrt{2}$	A
csúcstényező	$\sqrt{2}$	1

példa (2) csúcstényező ?

$$x(t) = A\cdot\cos(2\pi f_1 t) + A\cos(2\pi f_2 t + \varphi)$$

$$f_1 \neq f_2$$

$$S_x = \frac{A^2}{2} + \frac{A^2}{2} = A^2$$

csúcsérték : ált $2A$, ha f_1 és f_2 viszonya „sajátos" kisebb is lehet

$$\delta_{eff} = A$$

$$\text{csúcstényező} = \frac{2A}{A} = 2$$

példa (3) csúcstényező?

$x_1(t) = A\cdot\cos(2\pi f_0 t) + A\cdot\cos(2\pi 2 f_0 t) + A\cos(2\pi 3 f_0 t)$

$x_2(t) = A\cos(2\pi f_0 t) + A\sin(2\pi 2 f_0 t) + A\cos(2\pi 3 f_0 t)$

$x_1(t)$

csúcsérték: $3A$ $t=0$-nál

telj: $3\cdot\frac{A^2}{2}$

eff. ért: $\sqrt{\frac{3}{2}}A$

csúcstényező: $\frac{\text{csúcsért}}{\text{eff ért}} = \frac{3A}{\sqrt{\frac{3}{2}}A} = \underline{\underline{\sqrt{6}}}$

$x_2(t)$

efférték: $A\cdot\sqrt{\frac{3}{2}}$

csúcsérték: $\sqrt{5}A$

csúcstényező $= \frac{\sqrt{5}A}{\sqrt{\frac{3}{2}}A} = \underline{\underline{\sqrt{\frac{10}{3}}}}$

$2\pi(\overbrace{2f_0 + f_0}^{3f_0})t$

$\cos(\alpha+\beta) = \cos\alpha\cos\beta - \sin\alpha\cdot\sin\beta$

$\cos(\alpha-\beta) = \cos\alpha\cos\beta + \sin\alpha\cdot\sin\beta$ +

$2\pi\,\underbrace{(2f_0 - f_0)}_{f_0}t$

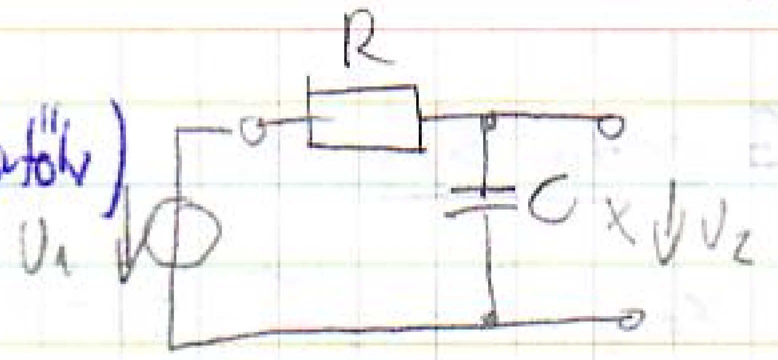
$\Rightarrow 2\cos(2\pi\cdot 2 f_0 t)\cdot\cos(2\pi f_0 t)$

$\Rightarrow x_2(t) = \underbrace{2A\cos(2\pi f_0 t)}_{a}\cos(2\pi 2 f_0 t) + \underbrace{A}_{b}\sin(2\pi 2 f_0 t)$

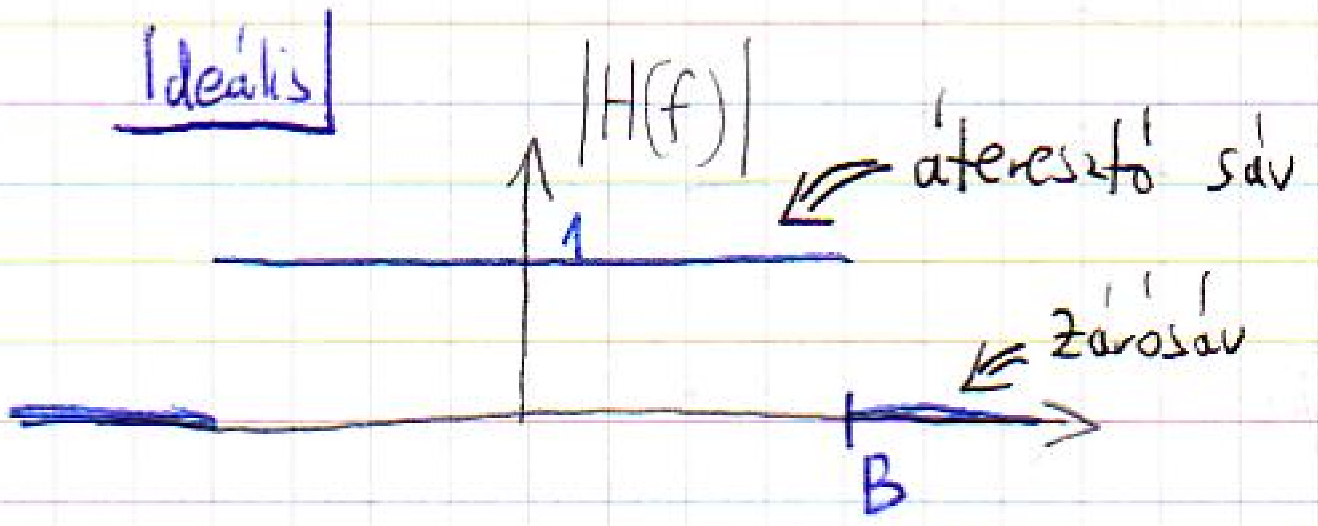
$= a\cdot\cos(2\pi 2 f_0 t) + b\cdot\sin(2\pi 2 f_0 t) = \sqrt{a^2+b^2}\cdot\cos\left(2\pi\cdot 2 f_0 t - \mathrm{arctg}\frac{b}{a}\right)$

$\sqrt{a^2+b^2} = \sqrt{A^2 + 4A^2\cdot\cos^2(2\pi f_0 t)} \underset{t=0}{\overset{max}{\Rightarrow}} \sqrt{A^2+4A^2} = \sqrt{5}A$

Ideális és elsőfokú szűrők összehasonlítása: (aluláteresztők)



Ideális



egyetlen paraméter: B (sávszélesség)

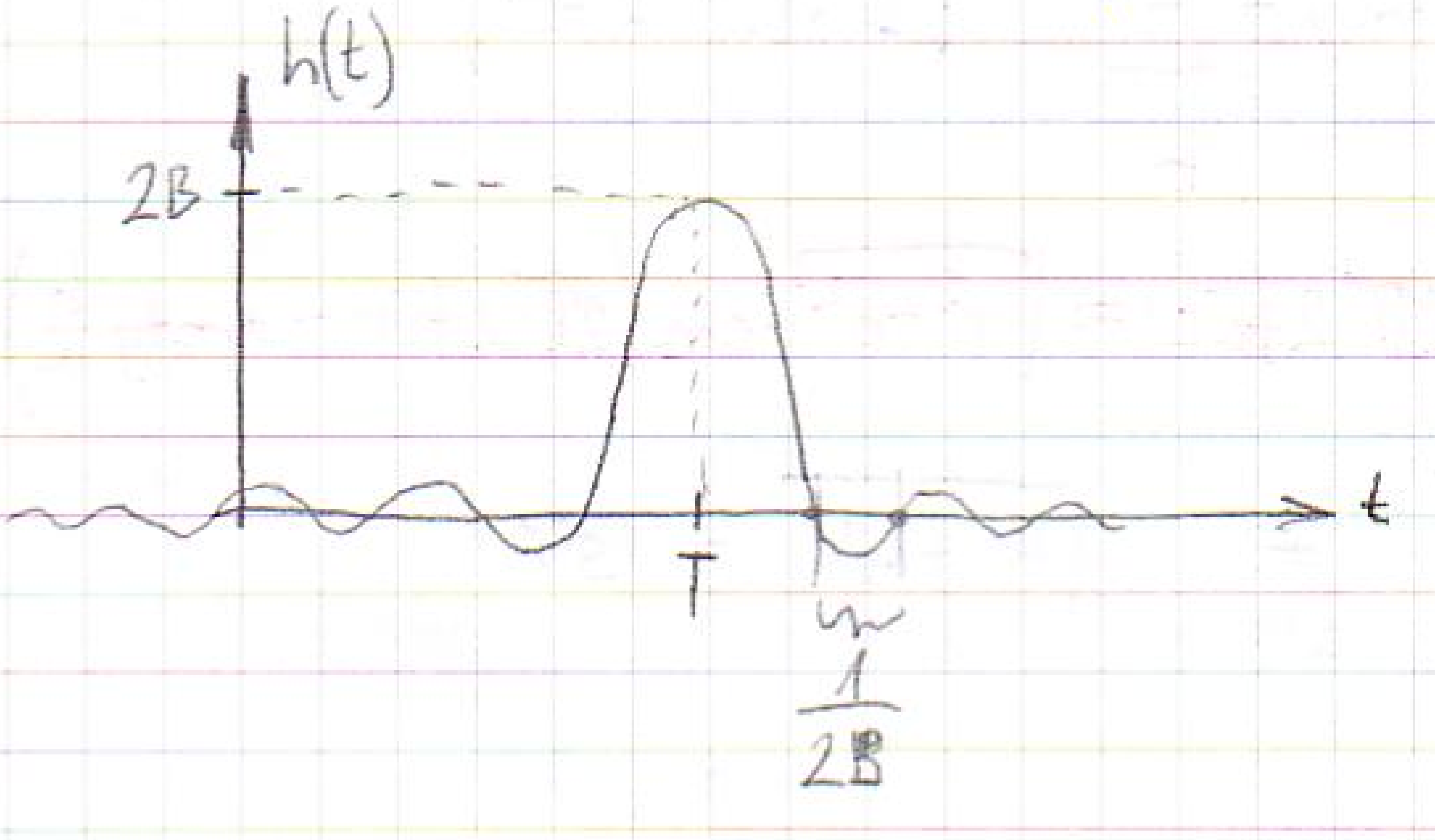
$$H(f) = \begin{cases} 1 \cdot e^{-j2\pi f T}, & \text{ha } |f| < B \\ 0 & \text{egyébként} \end{cases}$$

súlyfüggvény: $h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(f)\, e^{j2\pi f t}\, df$

$$h(t) = \int_{-B}^{B} e^{-j2\pi f T} \cdot e^{j2\pi f t}\, df = \int_{-B}^{B} e^{j2\pi f (t-T)}\, df =$$

$$= \left[\frac{e^{j2\pi f (t-T)}}{j2\pi (t-T)} \right]_{-B}^{B} = 2 \cdot \frac{e^{j2\pi B (t-T)} - e^{-j2\pi B (t-T)}}{2 \cdot j\, 2\pi (t-T)} =$$

$$= B \cdot \frac{2 \sin\left(2\pi B (t-T)\right)}{2\pi B (t-T)}$$

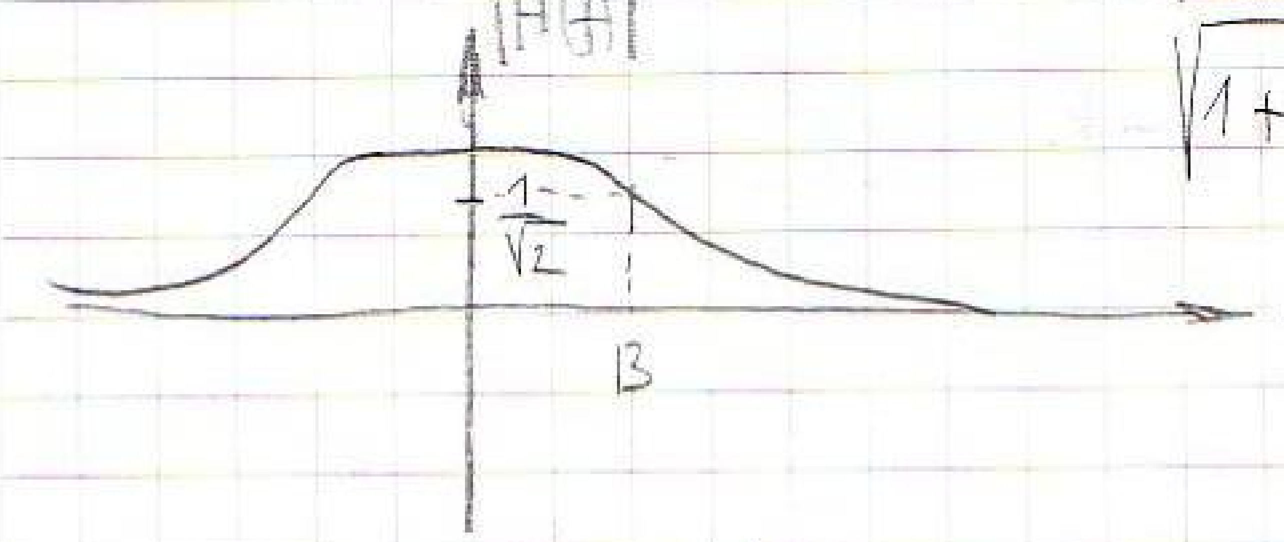


ideális szűrő nem valósítható meg, hiszen $t=0$ előtt nem lehet a $h(t)$

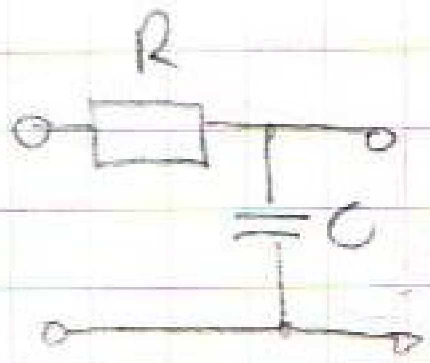
$\Rightarrow$ annál jobban közelíthető, minél nagyobb a T késleltetés

Elsőfokú szűrő:

$$H(f) = \frac{1}{1 + j\frac{f}{B}}$$

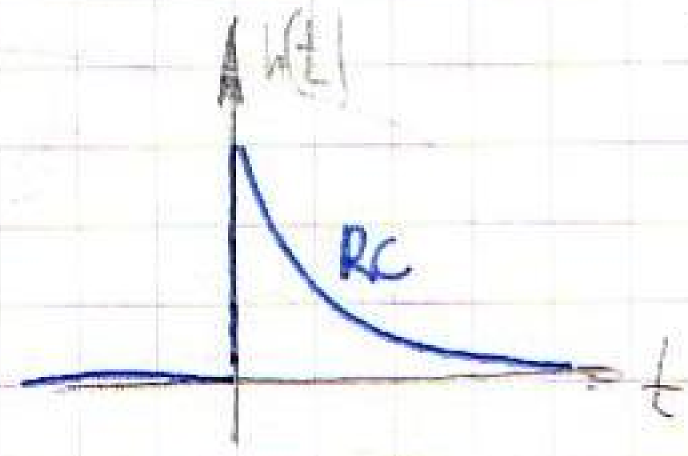


$$\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{f}{B}\right)^2}}$$



$$\frac{\frac{1}{j2\pi fC}}{R + \frac{1}{j2\pi fC}} = \frac{1}{1 + j2\pi RCf}$$

$$\frac{1}{B}$$

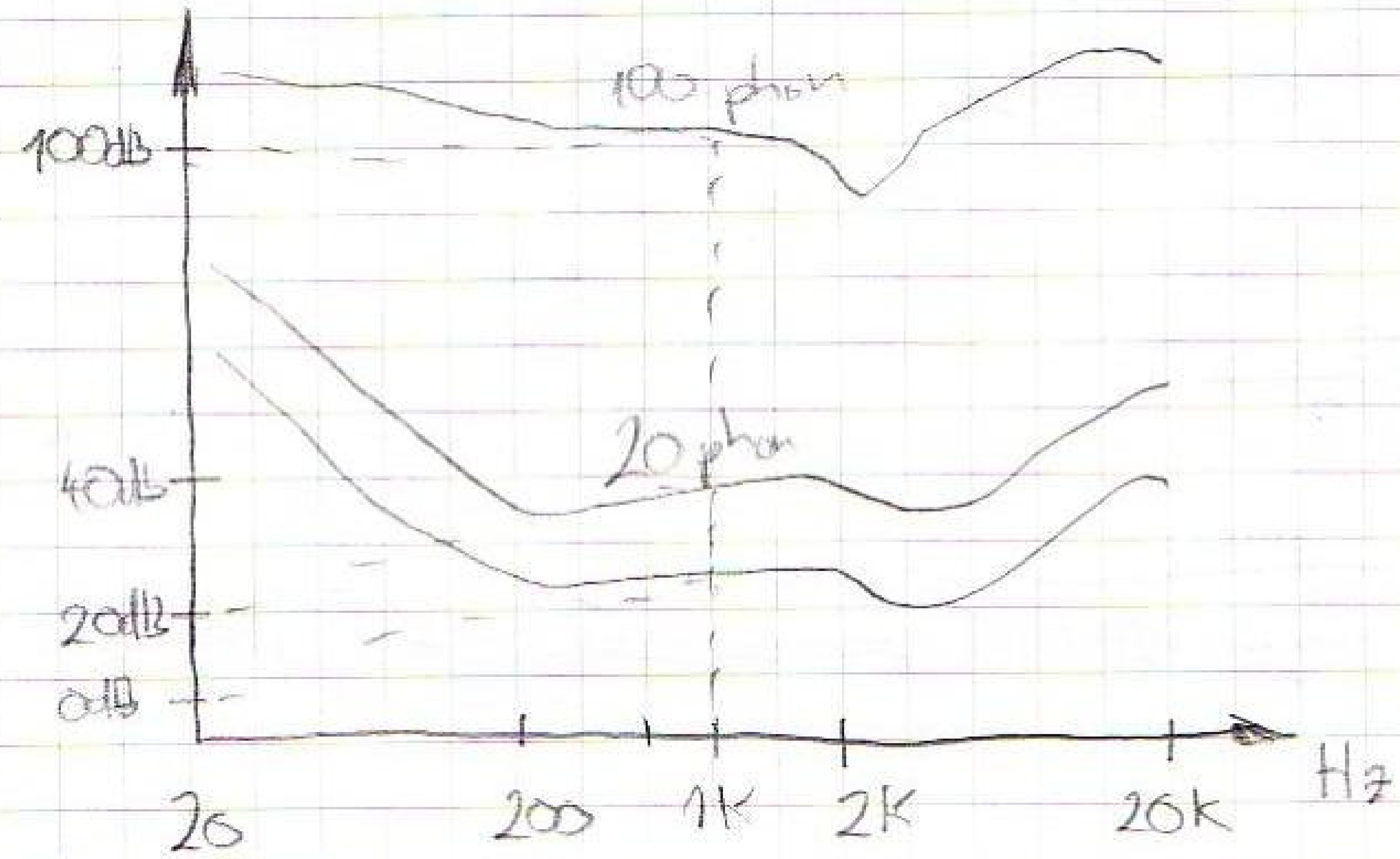


$$h(t) = a \cdot e^{-jbt}$$

$$a = b = 2\pi \cdot B$$

2007.09.17. hétfő II. Gyakorlat (2. hét)

Marosits Tamás (TMIT) IE 345 marosits@tmit.bme.hu



Példa (1) Mekkora hangosságú (phonban) az az 1KHz-es szinuszos frekv-jú hang amelynek intenzitása a hallásküszöb 100-szorosa

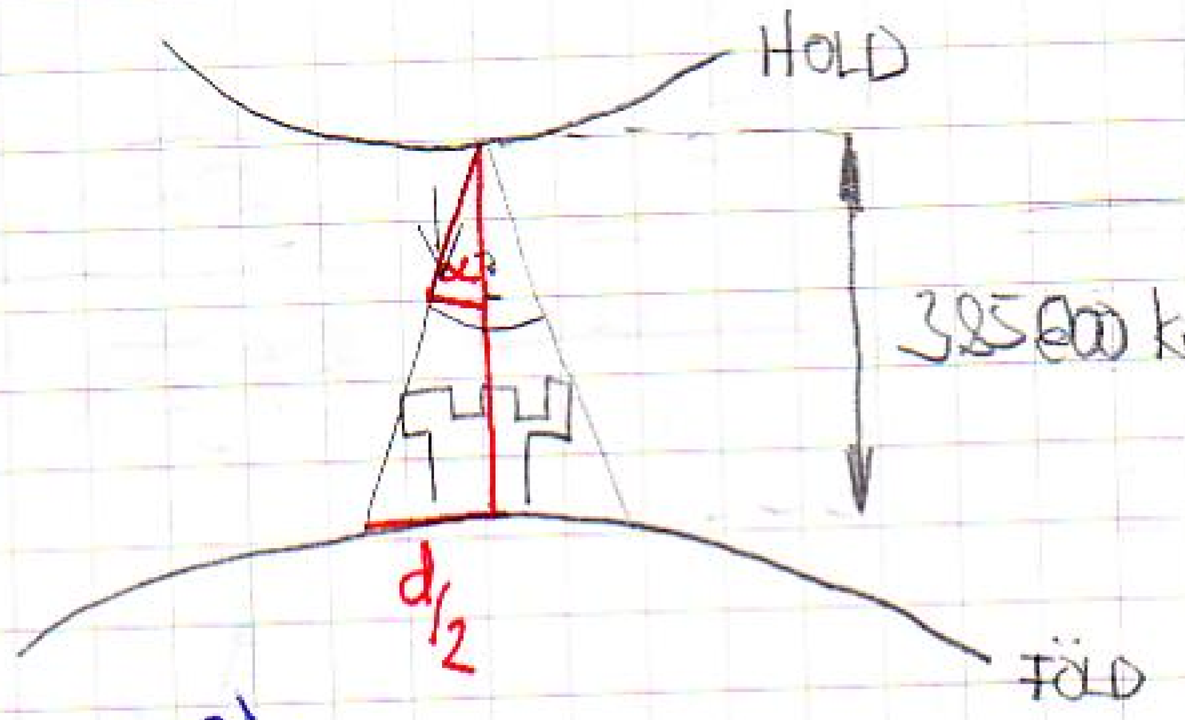
$$10 \lg\left(\frac{100}{1}\right) = 20 \text{ phon}$$

intenzitás 100x más frekv. is 20 phon, de nem 20dB!!

példa(2) Látszik-e a Kínai Nagy fal a Holdról?

csapok:

pálcikák:

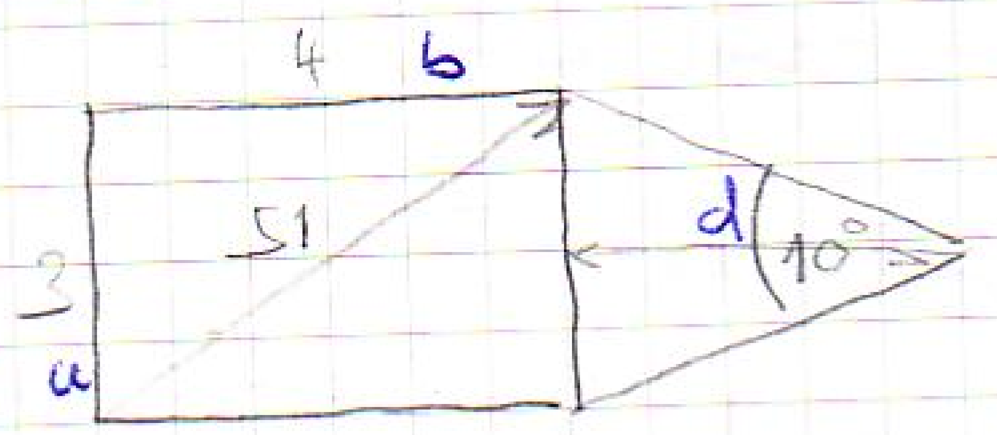


$\alpha = 2'/2$

$\frac{d}{2} = R \cdot tg\alpha \Rightarrow d = 224$ km

Geostac. műholdak pályamagassága ~ 36000 Km ⇒ d 22,4 Km

példa(3) Televízió 4:3, 51cm (átmérőjű) képátlójú, milyen messze nézzük?



$a = \frac{3}{5} \cdot 51 = 30,6$ cm

$(b = \frac{4}{5} \cdot 51)$

$d \cdot \tan 5° = \frac{30,6 cm}{2}$

$d = \frac{30,6 cm}{tang 5° \cdot 2} = \underline{\underline{174,88 cm}}$ ⇒ kis távolság a megszokotthoz képest

elm

600x800-as kép ⇒ 480000 pixel

FF: 100 világosság érték ~ 6,5 bit

Színes: 256-féle (szint) árnyalat az alapszínekből ⇒ 24 bit (3·8bit)

folyamatos kép 25-30 kép/sec

⇓

50-60 félkép/sec

[FF: 80Mbit/sec, színes: 84Mbit/sec a tankönyv szerint]

(de az emberi agy kevesebbet fogad fel ~100byte/sec)

példa (4) Adott egy színes kép az RGB pixel értékeivel
Hogyan csináljunk ezekből szürkeskálás képet

világosság: $y = 0{,}3R + 0{,}59G + 0{,}11B$

$u = \frac{B-y}{2{,}03}$ ha a zöldet vátoztjuk a világosság változik (y)

$v = \frac{R-y}{1{,}14}$ akkor a piros és kék (csak) szint nem változtatja

emiatt különbségi jelölést vezetünk be

$C_R = R - y \quad [-0{,}7 \ldots +0{,}7]$

$C_G = G - y \quad [-0{,}41 \ldots 0{,}41] \Rightarrow$ érdemes ezt elhagyni mert a legkevesebb infót tartalmazza

$C_B = B - y \quad [-0{,}89 \ldots 0{,}89]$

példa (5) Határozzuk meg $[R,G,B]$-t, ha $y, u, v = [0{,}205; 0{,}145; 0{,}259]$

$B - y = 2{,}03 \cdot 0{,}145 + y \quad \Rightarrow R = 0{,}5$

$G = \quad\quad \Rightarrow G = 0$

$R - y = 1{,}14 \cdot 0{,}259 + y \quad \Rightarrow B\ 0{,}5$

$\Rightarrow$ halvány (lila) magenta telítettség 100%

$y = 0{,}3R + 0{,}59G + 0{,}11B$

$y = \cancel{0{,}3(0{,}295 + y) + 0{,}59 \cdot 0{,}41 + 0{,}11(0{,}294}$

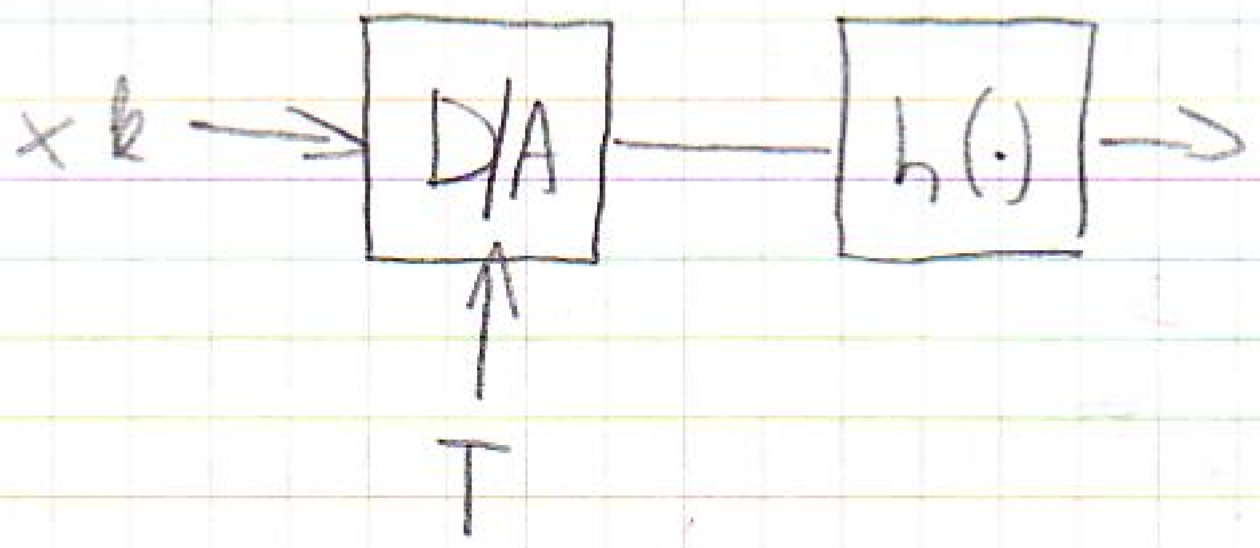
H S B (hue, saturation, brightness)

$\operatorname{arctg}\left(\frac{R-y}{B-y}\right) \quad 1 - \frac{\min(R,G,B)}{y} \quad y$

(színezet, telítettség, világosság)

elm

$k = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots$



$$\hat{x}(t) = T \sum_k x_k \, h(t - kT)$$

$$\hat{X}(f) = T \cdot H(f) \cdot X_p(f)$$

mintavett jel spektr. $X_p(f) = \sum_k x_k \, e^{-j2\pi k f T}$

Ha x_k-t úgy kapjuk, hogy $x(\cdot)$ analóg jel T időközű mintáit vesszük,
(azaz $x_k (k \cdot T)$) ekkor $X_p(f) \Rightarrow \frac{1}{T} \sum_i X\left(f - i\frac{1}{T}\right) =$

$$= f_s \cdot \sum_i X(f - i \cdot f_s)$$

mintavételi frekv.

Mintavett jel spektruma = az analóg jel spektrumának eltoltjai

Nevezzük F sávúnak a jelet, ha $X(f) = 0$, ha $f \notin F$

Ha $F = (-B, B) \Rightarrow$ sávhatárolt jel

Ha f_s-t jól választjuk, akkor F sávú jelek mintáiból tökéletesen visszaállíthatók

$\forall i \neq 0$-ra $X(f - i \cdot f_s) = 0$ ha $f \in F$

és $H(f) = \begin{cases} 1 & \text{ha } f \in F \\ 0 & \text{egyébként} \end{cases}$

$\Rightarrow \sum_i X(f - i f_s) = X(f)$ ha $f \in F$ [$\Rightarrow f_s \geq 2B$ sávkorl. esetben]

spektrum átlapolódásmentes lesz

2007.09.24. hétfő — III Gyakorlat (3.hét)

Kvantálás, digitális leképezés:

Egyenletes kvantálás:

- kvantálási lépcsőméret: (Δ)

- kódszóhossz : (n)

2^n érték

K-adik, kvantált

$x(t) \rightarrow \boxed{A/D} \rightarrow \hat{x}_k$

$f_s = \frac{1}{T}$

hiba/zaj

$\hat{x}_k = x(kT) + \underbrace{\varepsilon_k}$

kvantálási zaj/hiba

$M(\varepsilon_k) = 0$

$D^2(\varepsilon_k) = \frac{\Delta^2}{12}$

$-\frac{\Delta}{2} \leq \varepsilon_k \leq \frac{\Delta}{2}$

sin jel / max kitérés | $B < \frac{f_s}{2}$

$U_{pp} \leq \Delta 2^n$

$\varepsilon_k = \varepsilon(kT)$

(folyt. analóg jel)

$U_p = \frac{U_{pp}}{2}$ $\quad (U_{max} \Rightarrow 11\ldots1_B)$

spektrális sűrűség fv. $S_\varepsilon(f) = \frac{1}{f_s} \frac{\Delta^2}{12} \left|\underbrace{H(f)}\right|^2$

visszaállító szűrő

$$\boxed{SNR = \frac{\frac{U_p^2}{2}}{\frac{2B\Delta^2}{12 f_s}} = \underbrace{\frac{3}{2}}_{\text{sin}} \frac{f_s}{2B} \cdot 2^{2n}}$$

Áljelek / szivárgó jelek torzításai

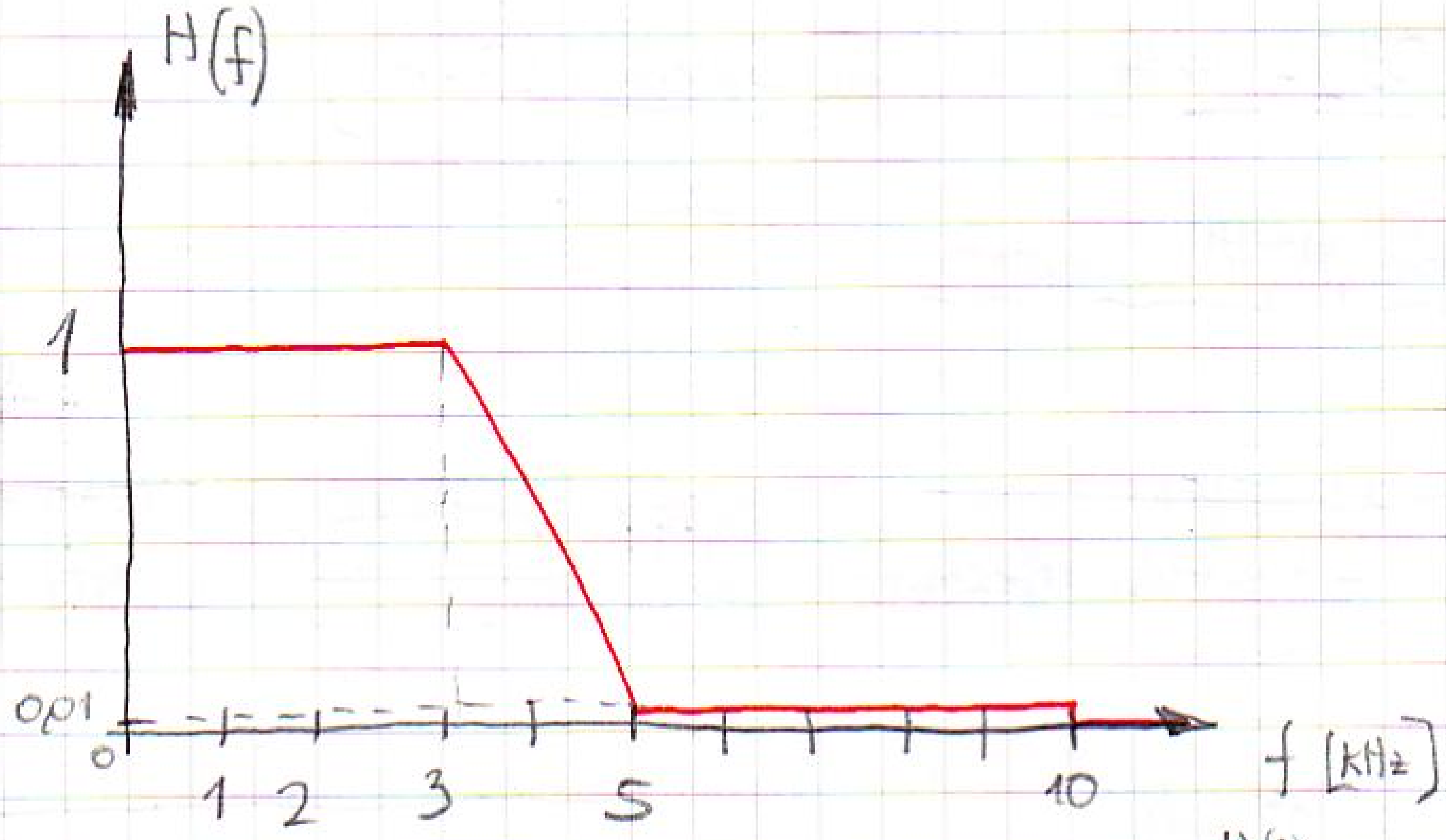
Áljelek : nem megfelelő bemeneti szűrő miatt

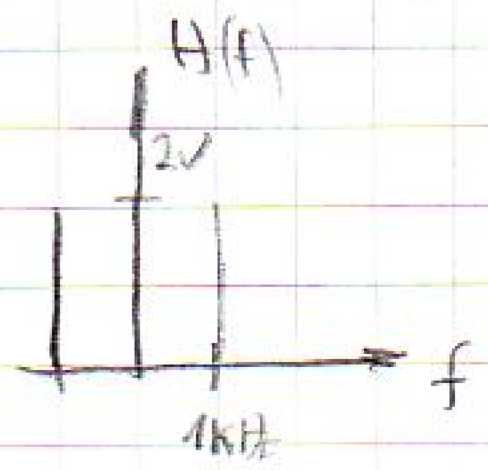
Szivárgójelek: kimenő szűrő nem megfelelő zárósávja miatt

példa

$f_s = 8\,\text{kHz}$

$$H_{in}(f) = H_{out}(f) = \begin{cases} 1 & \text{ha } |f| < 3\,\text{kHz} \\ 2{,}5 - \left|\frac{f}{2}\right| & \text{ha } 3\,\text{kHz} < |f| \leq 5\,\text{kHz} \\ 0{,}01 & \text{ha } 5\,\text{kHz} < |f| \leq 10\,\text{kHz} \\ 0 & \text{egyébként} \end{cases}$$



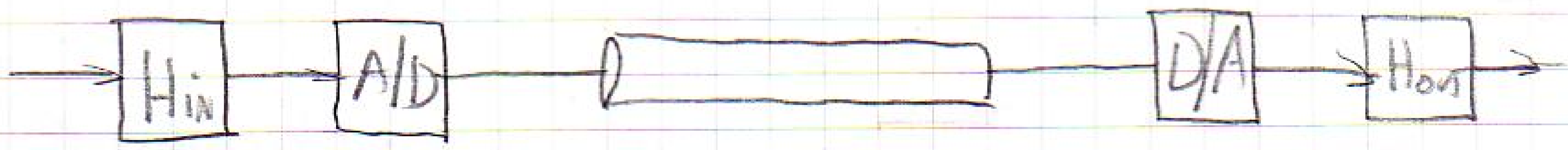


a) Bemenet : 2V 1 kHz szinusz

Mik lesznek a szivárgó komponensek?

b) Bemenet : 2V 4,5 kHz-es szinusz

Mi lesz a kimeneten?



a)

Mintavételezés => halmozott spektrum

$\pm\ n \cdot 8\,\text{kHz} \pm 1\,\text{kHz}$

komp	$\pm$ 1 kHz	$\pm$ 7 kHz	$\pm$ 9 kHz
Ampl:	2V	0,02V	0,02V => szivárgójelek

b)

$H_1(f=4{,}5\,\text{kHz}) = 2{,}5 - \frac{4{,}5}{2} = 0{,}25$ $\quad$ $H_{in}(f=3{,}5\,\text{kHz}) = 2{,}5 - \left(\frac{3{,}5}{2}\right) = 0{,}75$

$\pm\ n \cdot 8\,\text{kHz} \pm 4{,}5\,\text{kHz}$

$\pm 4{,}5$ kHz ; $\pm 3{,}5$ kHz

0,125V $\quad$ 0,375V $\quad$ => áljelek

$0{,}5 \cdot 0{,}25$ $\quad$ $0{,}5 \cdot 0{,}75$

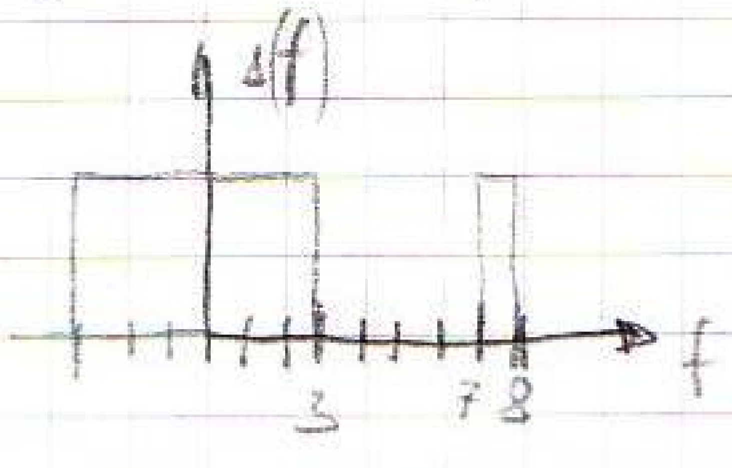
H_1 $\quad$ H_2

példa Stacionárius jel (50 Ω-on mért fesz)

$$s(f) = \begin{cases} s_0 & \text{ha } |f| \le 3\,kHz \text{ vagy } 7\,kHz \le |f| \le 8\,kHz \\ 0 & \text{egyébként} \end{cases}$$

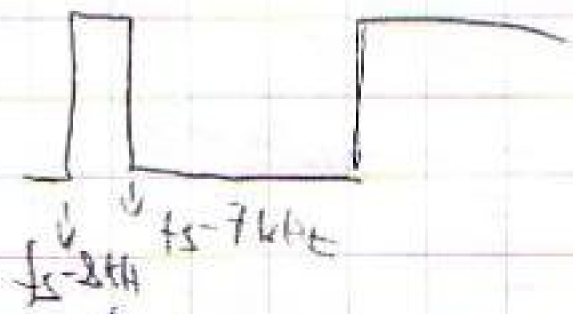
$P_{jel} = 0{,}2\,mW$

$$P_{jel} = \int_{-\infty}^{\infty} s(f)\,df$$



a) $s_0 = ?$

b) $f_s = ?$ (jól visszaállítható minta esetén)



a) $P_{jel} = s_0 \cdot 2 \cdot B_{össz} \Rightarrow s_0 = \frac{0{,}2}{2 \cdot 4} = 25\,\mu W/kHz$

$$s_0 = 50\,\Omega \cdot 25\,\mu W/kHz = 1250\,\frac{mV^2}{kHz}$$

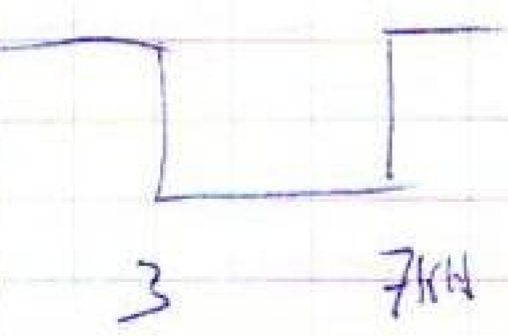
b1) $f_s \ge 2 f_{max}$

$f_s \ge 16\,kHz$ visszaállító szűrő aluláteresztő

b2) $11\,kHz \le f_s \le 14\,kHz$ sávszűrő

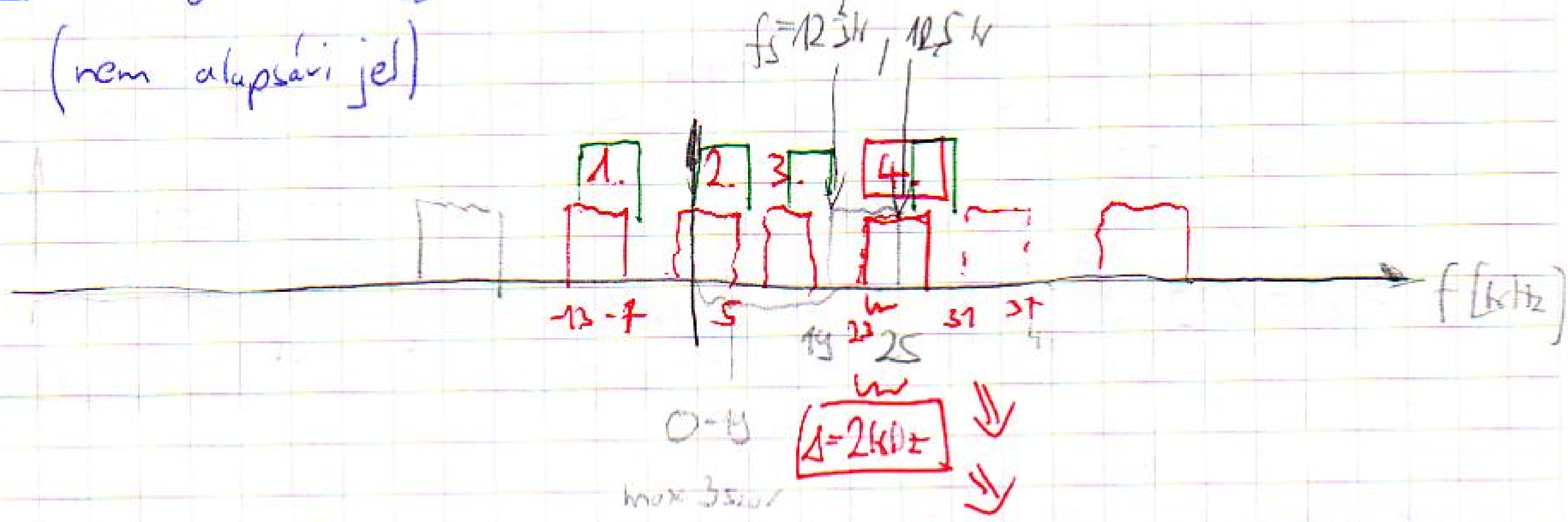
$f_s - 8\,kHz \ge 3\,kHz$

$f_s - 7\,kHz \le 7\,kHz$



példa) szükségesnél nagyobb mintavételezés!

(nem alapsávi jel)



$\frac{f_s}{2} = 6kHz \Rightarrow f_s = 12kHz$

$\boxed{1}$

$(-25, -19) \cup (19, 25)$

$\hookrightarrow (-13, -7) \cup (31, 37)$

$\hookrightarrow (-1, 5) \cup (43, 49)$

$\hookrightarrow (11, 17) \cup (55, 61)$

$\hookrightarrow (23, 29) \cup (67, 73)$

$\boxed{2}$

$(-12{,}5, -6{,}5) \cup (31{,}5, 37{,}5)$

$(0, 6) \cup (44, 50)$

$(12{,}5, 18{,}5) \cup (56{,}5, 62{,}5)$

$(25, 31) \cup (69, 75)$

$2 \cdot 19 \quad 3 f_s \leq 38 k$

$\underline{12{,}5 kHz < f_s} < 12\frac{2}{3} kHz$

b) Mi történik az SNR-rel, ha $f_s = 50kHz$

$\frac{3}{2} \frac{f_s}{2B} 2^{2n}$

példa 15 kHz-es sávszélességű jel

$f_s = 44$ kHz

$n = 20$ (A/D)

D/A 16 bites H_0 ideális aluláteresztő

Mekkorára javul az SNR, ha D/A-t 4szer olyan gyorsan működtetném?

$$SNR = \frac{3}{2}\frac{f_s}{2B}2^{2n} = \frac{3}{2}\frac{44k}{2\cdot 15k}2^{2\cdot 16} = 99{,}7\,dB$$

$$SNR^* = \frac{3}{2}\frac{4\cdot f_s}{2B}\cdot 2^{2n} = \frac{3}{2}\cdot\frac{4\cdot 44k}{2\cdot 15k}2^{2\cdot 16} = 105{,}7\,dB$$

a javulás **6dB** (10 lg 4)

mintha **1 bittel** javult volna a ~~A/D~~ D/A-nak

$\frac{3}{2}2^{2n} \leftarrow 8$

$\frac{3}{2}2^{16}$

$3\,2^{15}\cdot 4$

$\frac{3}{2}2^{18} \leftarrow n=9$

1 bit

2007.10.01. hétfő

IV Gyakorlat (4. hét)

$$\Delta\Psi = -k^2 \frac{\partial^2\Psi}{dt^2}$$ hullámegyenlet

$$\Psi(x,t) = A\, e^{-\gamma x} \cdot e^{j\omega t}$$ megoldás

$\gamma = k\omega$ terjedési együttható

$\gamma = \alpha + j\beta$

csill.-i tényező   fázis tényező

$$\beta = \frac{d\varphi}{dx}$$ térfrekvencia (térbeli f)

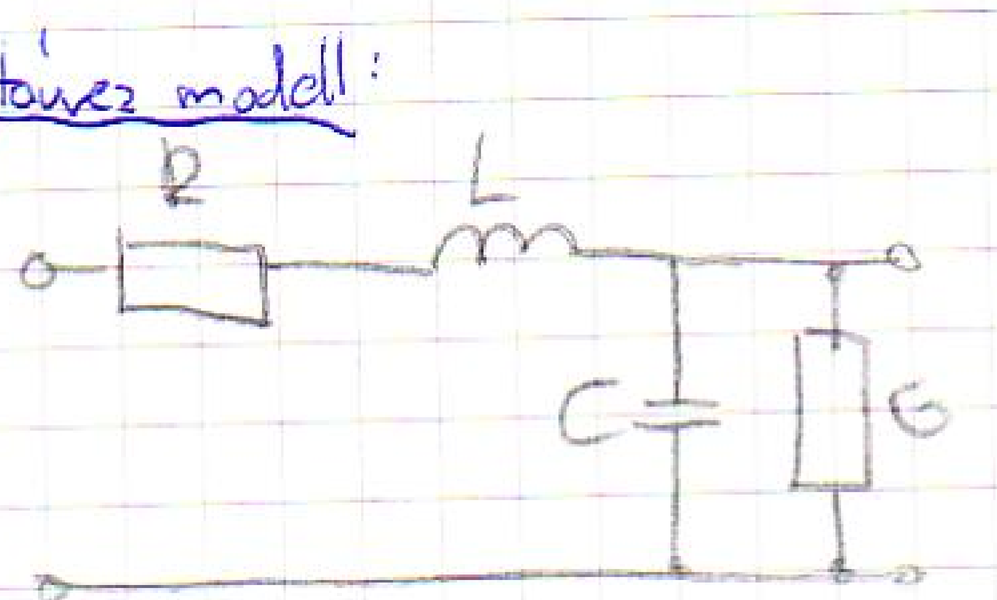
$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}$$ körfrek

$$\Psi(x,t) = A \cdot e^{-\alpha x} \cdot e^{j(\omega t - \beta x)}$$
$$= A \cdot e^{-\alpha x} \cdot e^{j\omega\left(t - \frac{x}{v_f}\right)}$$ (v_f: fázissebesség)

$$\frac{\Psi_1(x,t)}{\Psi_2(x,t)} = \frac{A_1}{A_2} = Z_0$$ hullámimpedancia (komplex!!!)

fáziskülönbség

id. távvez modell:



$Z_s = R + j\omega L$

$y_p = G + j\omega C$

távíró egyenletek:

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = Z_s \cdot i \overset{dx}{\Longrightarrow} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = Z_s y_p \cdot u$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = y_p \cdot u \overset{dx}{\Longrightarrow} \frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = Z_s y_p\, i$$

távíróegyenletek megoldása :

$$u(x,t) = U_0 \cdot e^{-\gamma x} \cdot e^{j\omega t}$$

$$i(x,t) = I_0 \cdot e^{-\gamma x} \cdot e^{j\omega t}$$

$$\gamma = \sqrt{Z_s \cdot Y_p} = \sqrt{(R+j\omega L)(G+j\omega C)}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z_s}{Y_p}} = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}}$$

$$\gamma = j\omega\sqrt{LC} \sqrt{1-j\frac{R}{\omega L}} \cdot \sqrt{1-j\frac{G}{\omega C}}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \sqrt{\frac{1-j\frac{R}{\omega L}}{1-j\frac{G}{\omega C}}}$$

Kábelekre jellemző : $R/L \gg G/C$!!!

nagy nagy (egymás mellett futnak)

Vivőfrekvenciás rendszerek: $\omega L \gg R$!!!

$$\sqrt{1-x} \xRightarrow{x \text{ kicsi}} 1-\frac{x}{2}$$

$$\gamma \cong j\omega\sqrt{LC} \cdot \left[1-\frac{j}{2\omega}\left(\frac{R}{L}+\frac{G}{C}\right)\right]$$

$$\alpha = Re\{\gamma\} = \frac{R}{2}\sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2}\sqrt{\frac{L}{C}} \approx \frac{1}{2}\frac{R}{Z_0} + \frac{1}{2} G \cdot Z_0$$

$$\beta = Im\{\gamma\} \cong \omega\sqrt{LC}$$

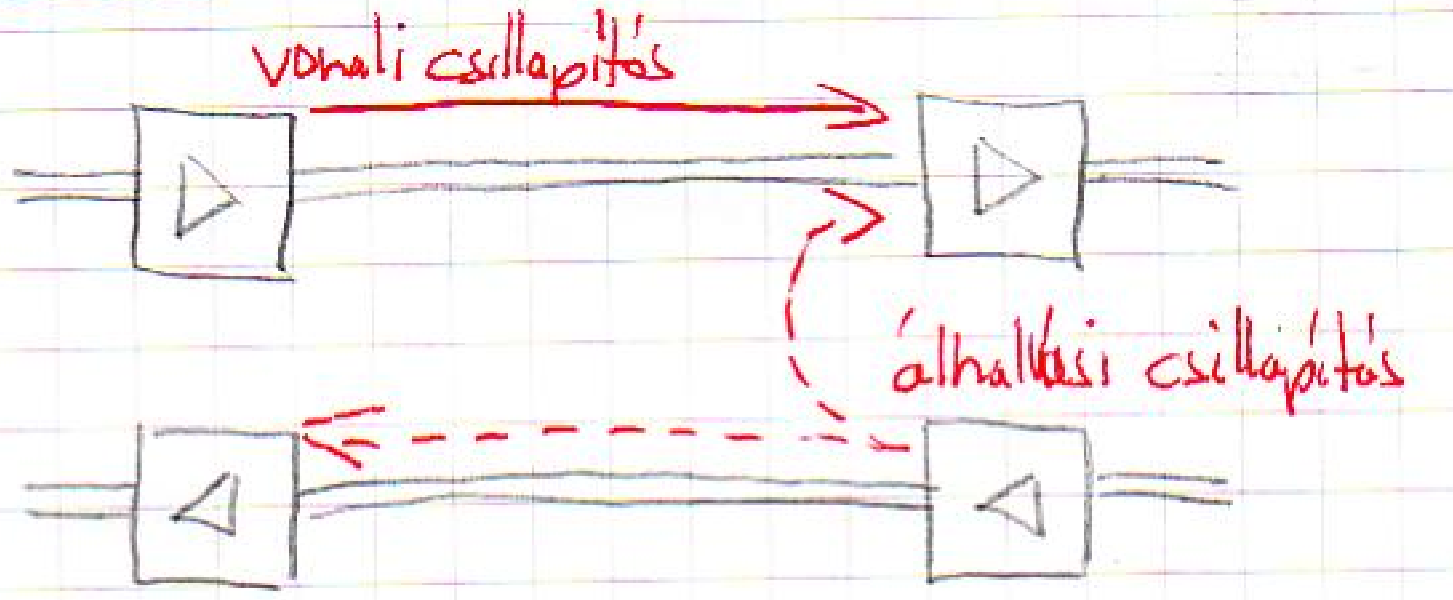
$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}\left[1-\frac{j}{2\omega}\left(\frac{R}{L}-\frac{G}{C}\right)\right] \approx \frac{L}{C}$$

példa (1) Milyen hosszú lehet egy szimmetrikus kábel vivőfrekvenciás erősített szakasza, ha

$R = 54{,}3 \frac{\Omega}{km}$ $\quad L = 0{,}7 \frac{mH}{km}$

$G = 1 \frac{\mu S}{km}$ $\quad C = 38{,}5 \frac{nF}{km}$

és az áthallási védettség legalább 65dB legyen, ha közelvégi áthallási csillapítás 91dB ? (távolvégi) → SNR



Vivőfrekv. rendszer: $2\pi f L = \omega L >> R$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{0{,}7 \cdot 10^{-3}}{38{,}5 \cdot 10^{-9}}} = 134{,}84\ \Omega$$

$$\alpha = (20 \lg e)\left(\frac{1}{2}\frac{R}{Z_0} + \frac{1}{2} G Z_0\right) = 1{,}74 \frac{dB}{km}$$

$$S_{áthallott} = S_{adás} - a_{közelvégi}$$

$$S_{hasznos} = S_{adás} - \alpha \cdot l$$

$$K_{közelvégi} = S_{hasznos} - S_{áthallott} =$$

$$= a_{közelvégi} - \alpha \cdot l \Rightarrow l = \frac{(91-65)}{\alpha} \approx 15 km$$

példa (2)

Hogyan változik a vivőfrekvenciás kábel csillapítása az L/C függvényében?

$$\alpha = \frac{R}{2}\sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2}\sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$\frac{R}{2}\sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2}\sqrt{\frac{L}{C}} \geq \sqrt{R \cdot G}$$ (számtani-mértani közép egyenlőtlenség)

$$=$$

$$=$$

$$R\sqrt{\frac{C}{L}} = G\sqrt{\frac{L}{C}} \Rightarrow \boxed{\frac{L}{C} = \frac{R}{G}}$$ (A nagyfrekv. csillapítás minimuma)

$$\Downarrow$$

$$\frac{G}{C} = \frac{R}{L}$$

ált.: $\frac{R}{L} \gg \frac{G}{C}$

↳ Krarup, pupinozás megoldás nem jó (reflexió szűrése)

Diszperzió:

módus: fényvezetőben többmódusú fényszétfolyik az időben (különb utak)

kromatikus:

példa (3) Monomódusú fényvezető rendszeren 100 MHz sávszélesség igényű digitális jelet tudunk továbbítani. Mekkora a maximális ismétlőtávolság hossza?

$$\Longrightarrow$$

kromatikus diszperzió	(D_c)	$= 5ps\ (nm \cdot km)$ 10^{-9}
Szálcsillapítás	(α)	$= 1{,}2\ dB/km$
gyártási hossz	(l_0)	$= 1{,}5\ km$
kötéscsillapítás	(a_s)	$= 0{,}2\ dB$
bontható csatlakozók csill	(a_c)	$= 2\ dB$
adó modulálatlan sávsz.	$(\Delta\lambda)$	$= 10\ nm$ (10^{-9})
adó teljesítmény (szálba)	(P_T)	$= 10\ mW$
adó sávsz.	(B_T)	$= 1\ GHz$
vevő zajkorlát érz	(P_R)	$= 1\ pW$
vevő sávsz	(B_R)	$= 800\ MHz$

csillapításkorlátolt hossz

$$\alpha' = \alpha + \frac{a_s}{1{,}5}$$

$$a = \left(\alpha + \frac{a_s}{l_0}\right) \cdot L + 2a_c \leq 10\lg\frac{P_T}{P_R}$$

$$L \leq \frac{\left[10\lg\left(\frac{P_T}{P_R}\right)\right] - 2a_c}{\alpha + \frac{a_s}{l_0}}$$

$$\underline{\underline{L}} \leq \frac{96\ dB}{(1{,}2 + 0{,}133)\frac{dB}{km}} = \underline{\underline{72\ km}}$$ (csill korlát)

Diszperzió határolt hossz :

$$W_C = D_C \cdot L \cdot \Delta\lambda$$

$$B_C \; \frac{\sqrt{2}\,\ln(2/\pi)}{W_C}$$ ← (valami gauss impl.-nál) 3dB-es sávszélességre tartozik

$$B_C = \frac{0{,}31}{D_C \cdot L \cdot \Delta\lambda}$$

$$\frac{1}{B^2} = \frac{1}{B_C^2} + \frac{1}{B_T^2} + \frac{1}{B_R^2}$$

$$B_C = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{B^2} - \frac{1}{B_T^2} - \frac{1}{B_R^2}}} \approx 101{,}2\,\mathrm{MHz}$$ ⇐ $\Rightarrow \overset{100\,\mathrm{MHz}}{B} \sim B_C$ (mivel $B_T, B_R \gg B$)

$$\underline{L} = 0{,}31 \,/\, 101{,}3\,\mathrm{MHz} \cdot 5\,\mathrm{ps/nm \cdot km}\ 10\,\mathrm{nm} = \underline{\underline{61{,}2\,\mathrm{km}}}$$

$\Rightarrow$ rendszerünket a diszperzió korlátozza

(de korlátozható volna a csill. korlát ezért számoltunk vele is)