

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Principy a perspektivy aktivních metod v akustice

Ondřej Jiříček

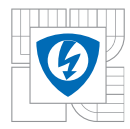
5.3.2010

Tato prezentace je spolufinancována Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.



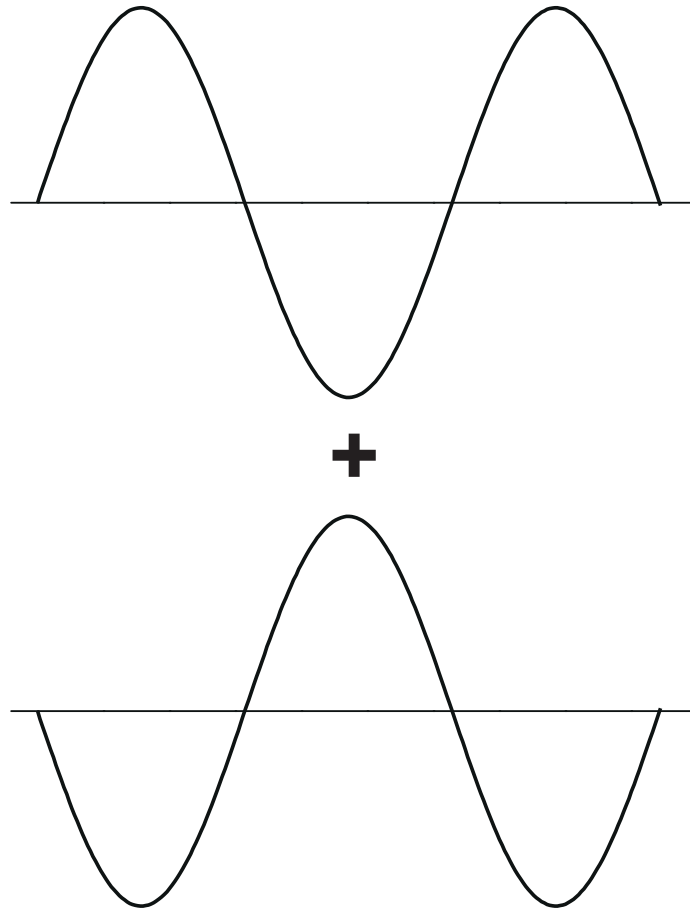
O čem to bude

- Princip
- Trocha historie
- Jednorozměrný případ – zvukovody
- Strategie aktivního řízení zvukových polí
 - ▶ feedback
 - ▶ feedforward
- Trojrozměrné případy
 - ▶ globální řízení
 - ▶ lokální řízení
- Aplikace
- Co dál...

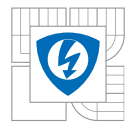


Princip

■ Interference zvukových vln

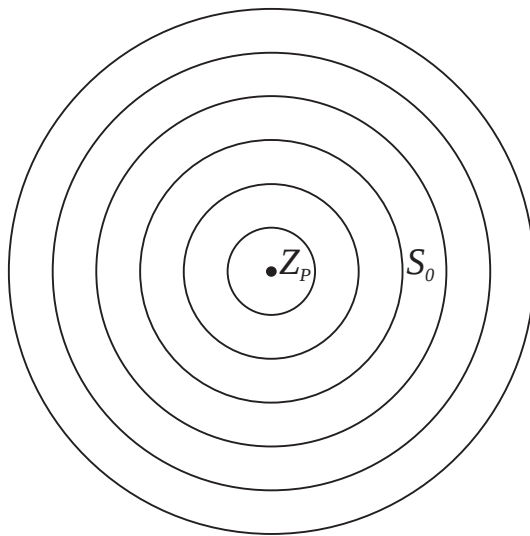


=> ticho

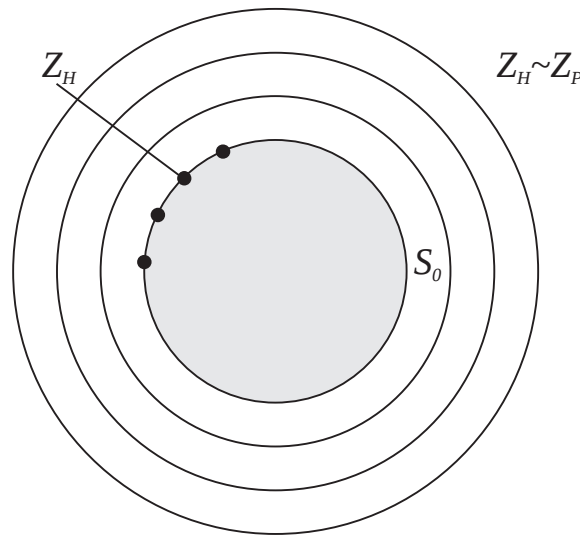


Princip

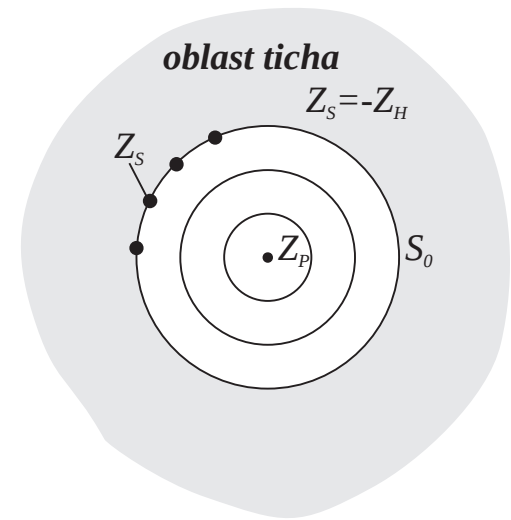
- Interference zvukových vln
- Huygensův princip



a)



b)



c)



Princip

- Interference zvukových vln
- Huygensův princip
- Akustická vazba
 - ▶ Vyzářený akustický výkon je snížen pomocí druhého zdroje v blízkosti primárního zdroje hluku
 - ▶ Monopól → dipól
 - ▶ Dipól → kvadrupól



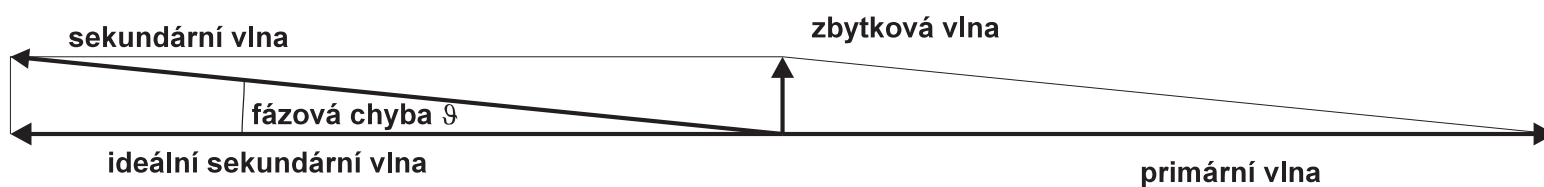
Princip

- Interference zvukových vln
- Huygensův princip
- Akustická vazba
- Řízení módů
 - ▶ Malé uzavřené prostory
 - ▶ Amplitudy módů vytvářených primárním zdrojem hluku jsou potlačovány sekundárními zdroji
 - ▶ Rozmístění sekundárních zdrojů je klíčové



Princip

■ Interference zvukových vln

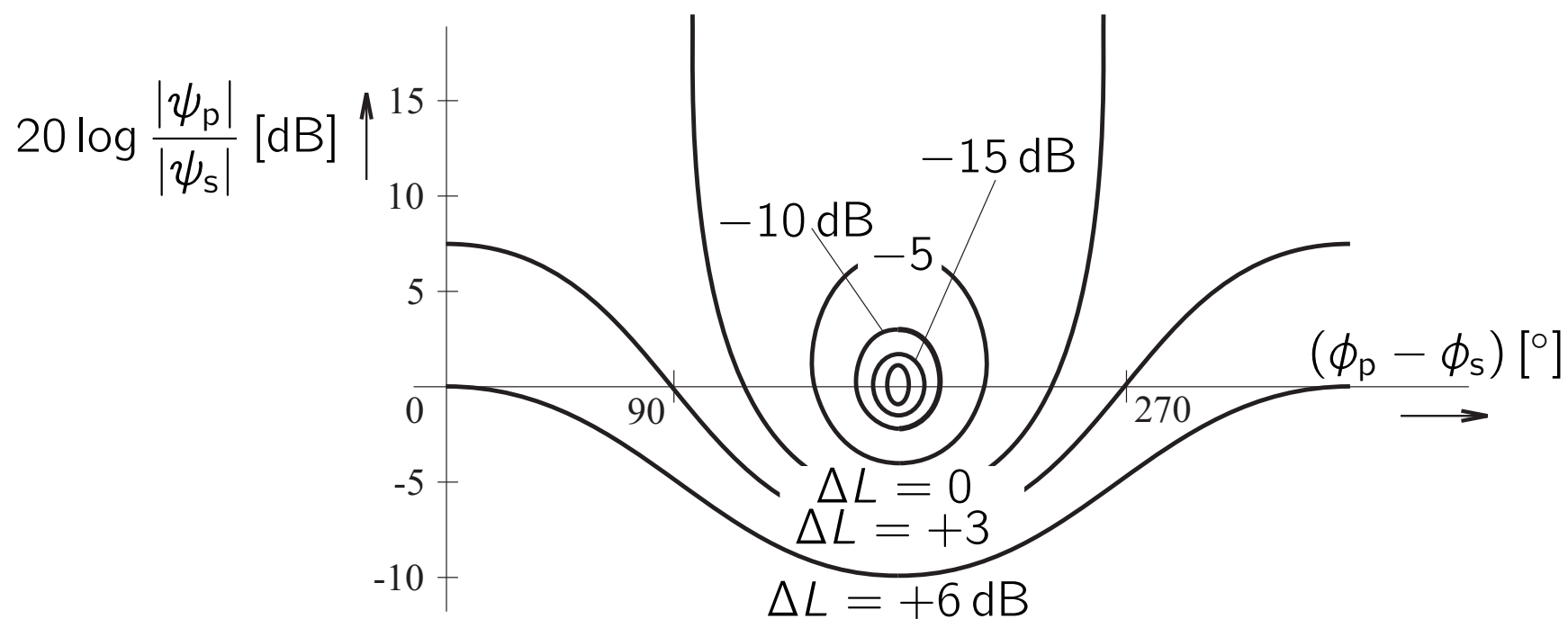


■ útlum 20 dB $\Rightarrow \vartheta \leq 4,7^\circ$

■ útlum 30 dB $\Rightarrow \vartheta \leq 2,8^\circ$



Princip





Historie aktivního snižování hluku

- Christian Huygens 1678
- Lord Rayleigh 1877

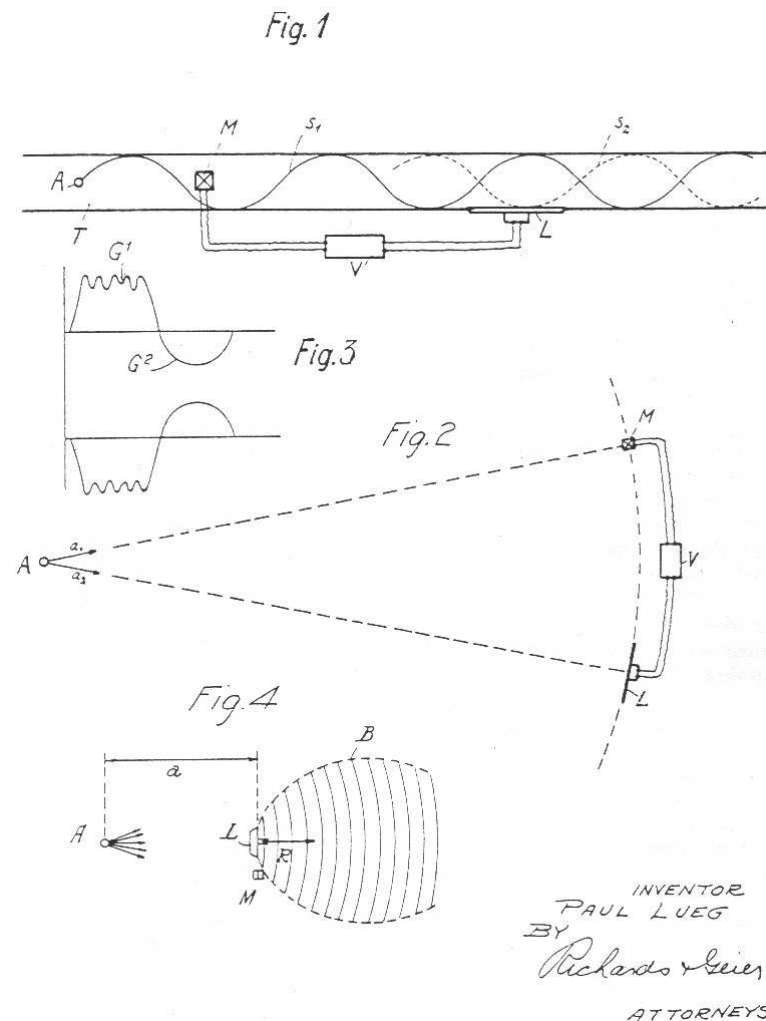


Historie aktivního snižování hluku

- Christian Huygens 1678
- Lord Rayleigh 1877
- Paul Lueg 1936



Historie aktivního snižování hluku



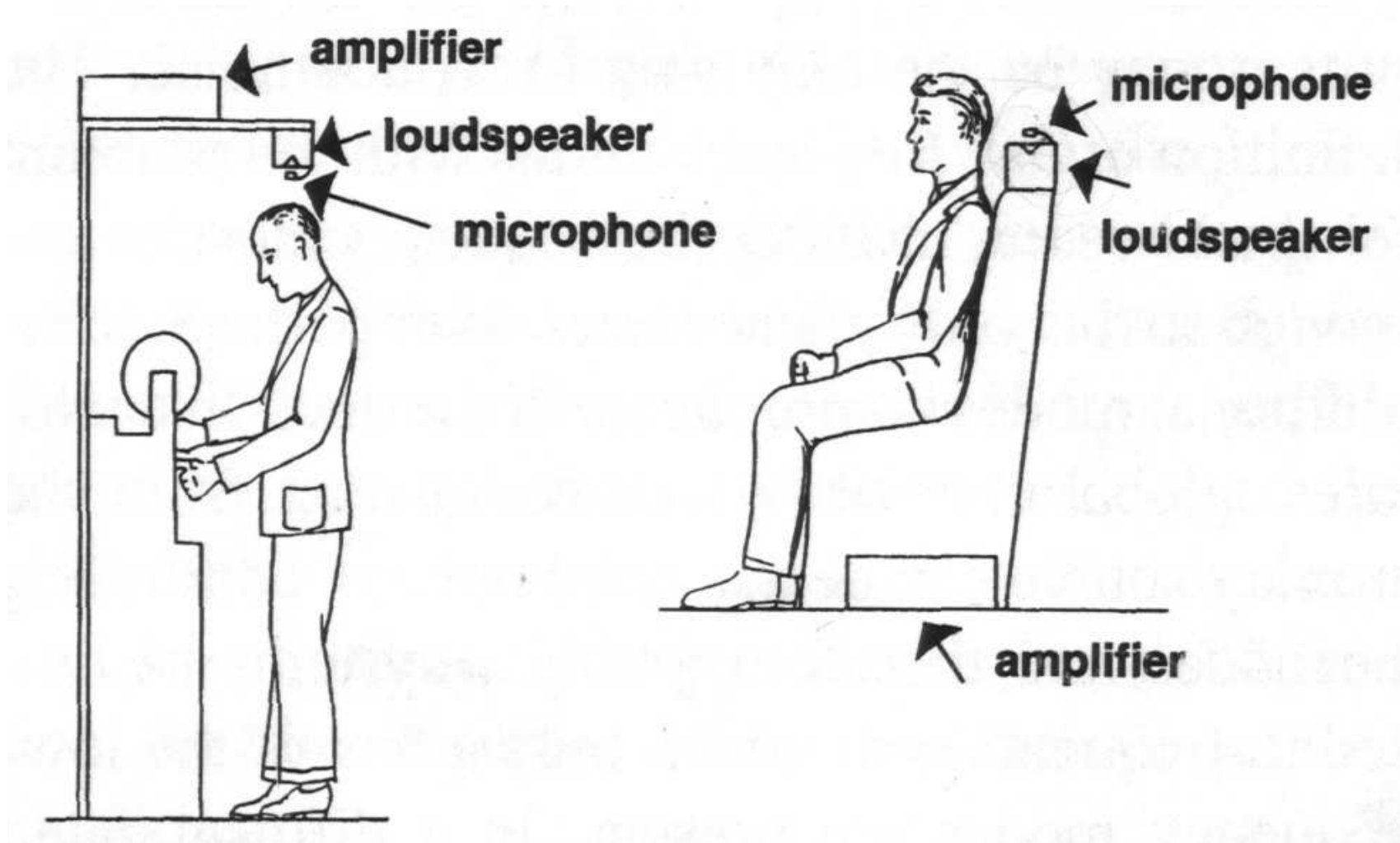


Historie aktivního snižování hluku

- Christian Huygens 1678
- Lord Rayleigh 1877
- Paul Lueg 1936
- Olson a May 1953



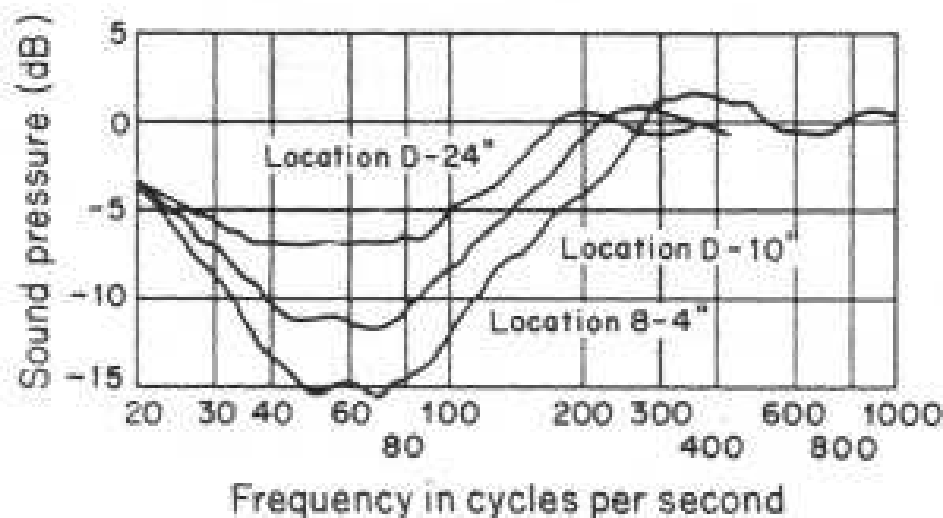
Historie aktivního snižování hluku





Historie aktivního snižování hluku

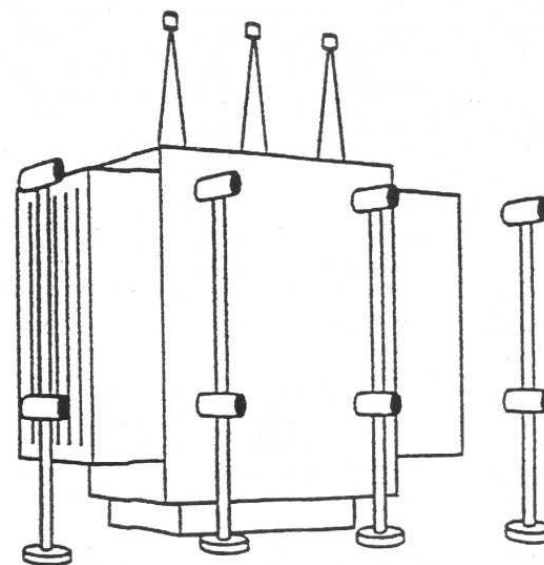
- Christian Huygens 1678
- Lord Rayleigh 1877
- Paul Lueg 1936
- Olson a May 1953





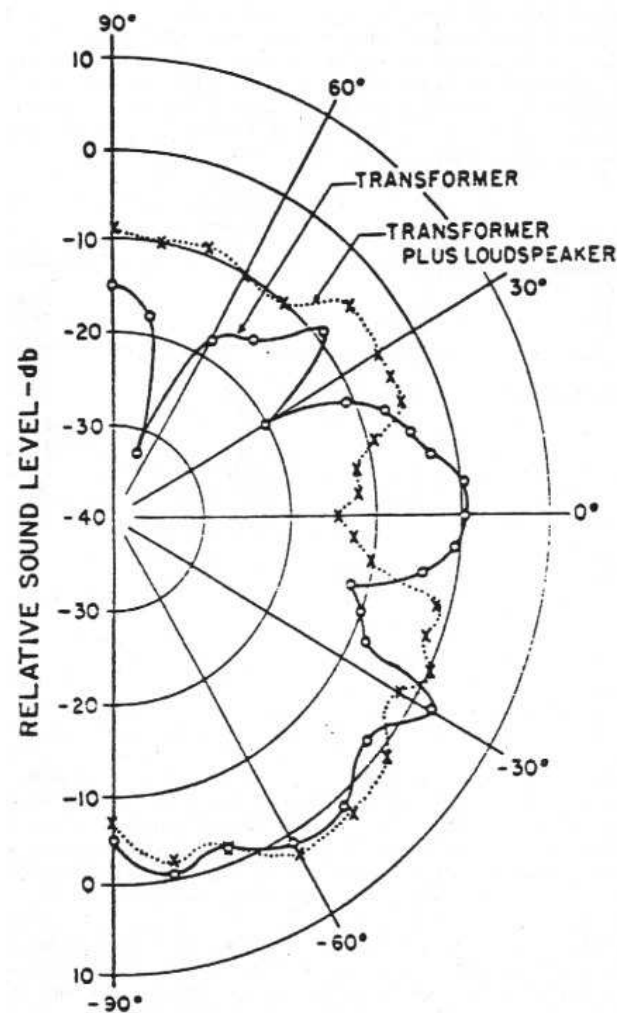
Historie aktivního snižování hluku

- Christian Huygens 1678
- Lord Rayleigh 1877
- Paul Lueg 1936
- Olson a May 1953
- Conover 1956



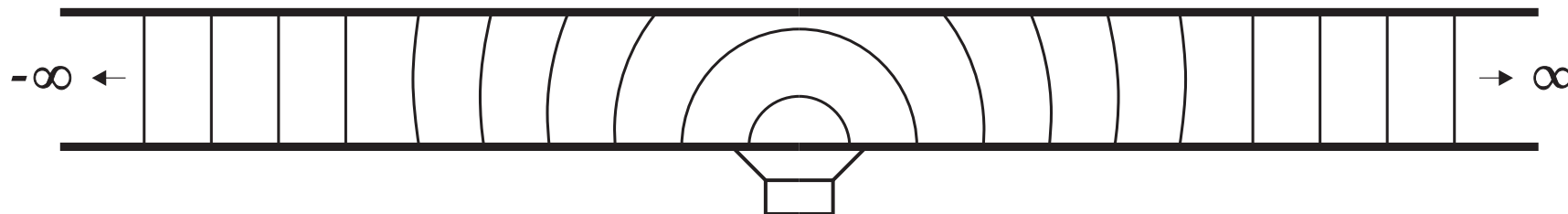


Historie aktivního snižování hluku





Řízení zvuku v potrubí – 1D případ



$$\lambda > 1,7d, \text{ resp. } \lambda > 2h$$



Řízení zvuku v potrubí – 1D případ

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \psi = 0$$

$$\psi(x, t) = Ae^{j(\omega t - kx)} + Be^{j(\omega t + kx)}, \quad k = \omega / c_0$$



Řízení zvuku v potrubí – 1D případ

$$D/Dt = \partial/\partial t + U \partial/\partial x$$

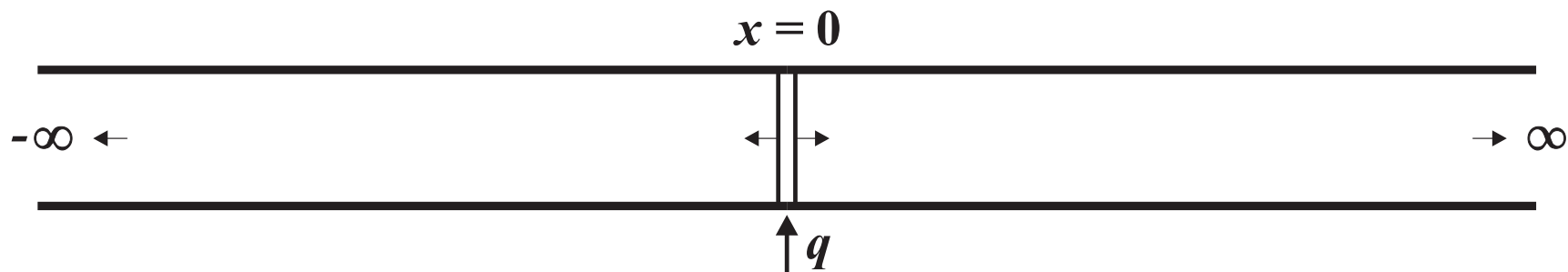
$$\left(\frac{D^2}{Dt^2} - c_0^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \psi = 0$$

$$\psi(x, t) = A e^{j(\omega t - \omega x / (c_0 + U))} + B e^{j(\omega t + \omega x / (c_0 - U))}.$$

Proudění obvykle zanedbáváme



Řízení zvuku v potrubí – 1D případ



$$q(t) = Ae^{j\omega t} \quad v_+ = \frac{q}{2S}, \quad v_- = -\frac{q}{2S}, \quad v(x) = \frac{q}{2S} e^{-jk|x|}$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t}, \quad p = \rho_0 c_0 v, \quad p(x) = \frac{\rho_0 c_0}{2S} q e^{-jk|x|}$$



Řízení zvuku v potrubí – 1D případ



$$p_p(x) = \frac{\rho_0 c_0}{2S} q_p e^{-jk|x|} \quad p_s(x) = \frac{\rho_0 c_0}{2S} q_s e^{-jk|x-L|}$$

$$p(x) = p_p(x) + p_s(x) \quad p(x) = 0, \quad \text{pro } x > L$$

$$\frac{\rho_0 c_0}{2S} q_p e^{-jkx} + \frac{\rho_0 c_0}{2S} q_s e^{-jk(x-L)} = 0 \quad \Rightarrow \quad q_s = -q_p e^{-jkL}$$



Řízení zvuku v potrubí – 1D případ



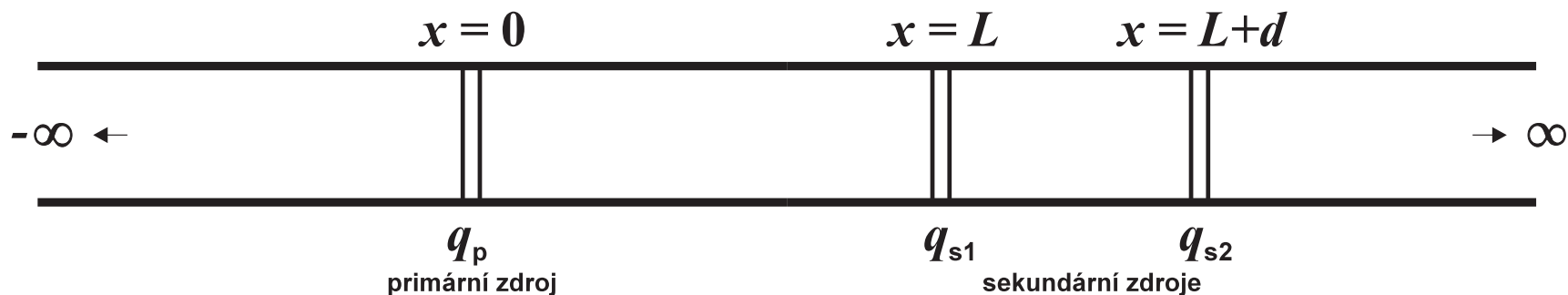
$$p(x) = \frac{\rho_0 c_0}{2S} q_p e^{-jkL} \left(e^{jk(L-x)} - e^{-jk(L-x)} \right), \quad 0 < x < L$$

$$p(x) = \frac{\rho_0 c_0}{2S} q_p e^{jkx} (1 - e^{-j2kL}), \quad x < 0$$

$$kL = n\pi \Leftrightarrow L = n\lambda/2 \Rightarrow p(x) = 0, \quad x < 0$$



Řízení zvuku v potrubí – 1D případ



$$x > L + d$$

$$p(x) = \frac{\rho_0 c_0}{2S} q_p e^{-jkx} + \frac{\rho_0 c_0}{2S} q_{s1} e^{-jk(x-L)} + \frac{\rho_0 c_0}{2S} q_{s2} e^{-jk(x-(L+d))}$$

$$q_{s1} = -q_{s2} e^{-jkd}, \quad q_{s2} = -q_p \frac{e^{-jkl}}{2j \sin kd}$$



Řízení zvuku v potrubí – 1D případ



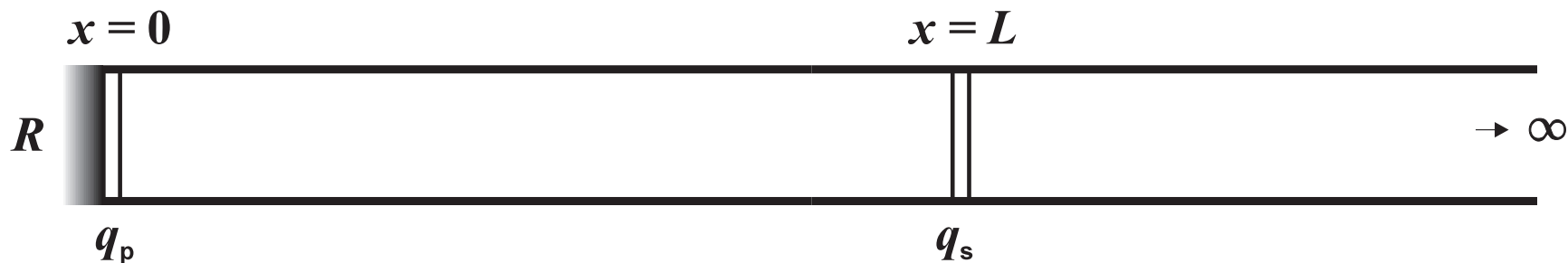
$$p_p(x) = \frac{\rho_0 c_0}{2S} q_p e^{-jkx} (1 + R)$$

$$p(x) = \frac{\rho_0 c_0}{2S} [q_p (1 + R) + q_s (e^{jkL} + R e^{-jkL})] e^{-jkx}, \quad x > L$$

$$p(x) = \frac{\rho_0 c_0}{2S} \left[q_p (1 + R) e^{-jkx} + q_s \left(e^{-jk(L-x)} + R e^{-jk(L+x)} \right) \right], \quad 0 < x < L$$



Řízení zvuku v potrubí – 1D případ

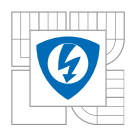


$$p(x) = 0, \quad x > L$$

$$q_s = -q_p \frac{1 + R}{e^{jkL} + R e^{-jkL}}$$

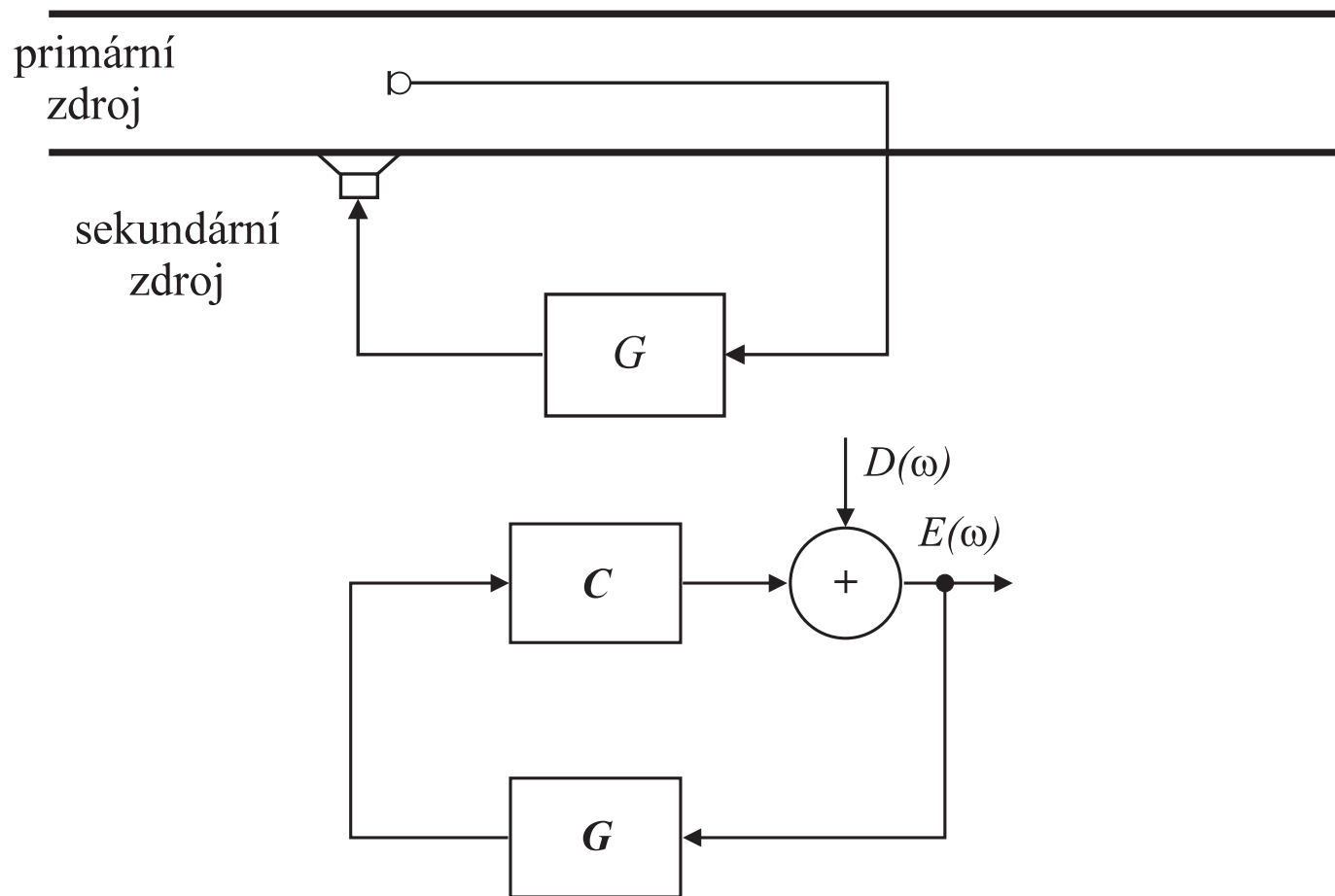
$$R = 1, \quad q_s = -\frac{q_p}{\cos(kL)}$$

$$f = \frac{c_0(2n+1)}{4L}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \Rightarrow q_s \rightarrow \infty$$



Strategie aktivního řízení zvukových polí

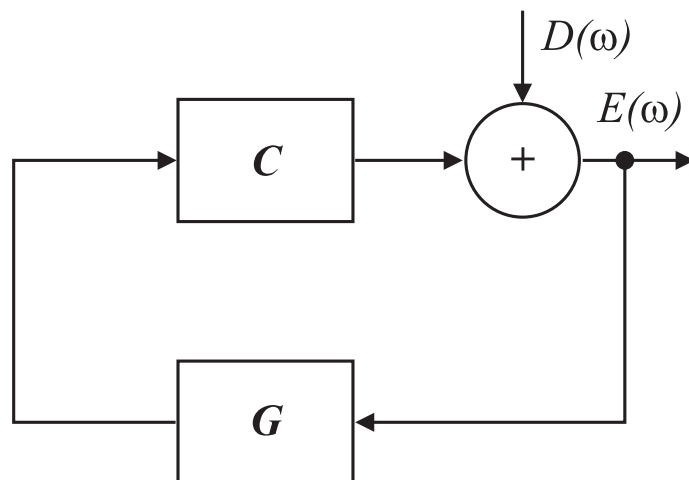
Zpětná vazba - feedback strategie





Strategie aktivního řízení zvukových polí

Zpětná vazba - feedback strategie



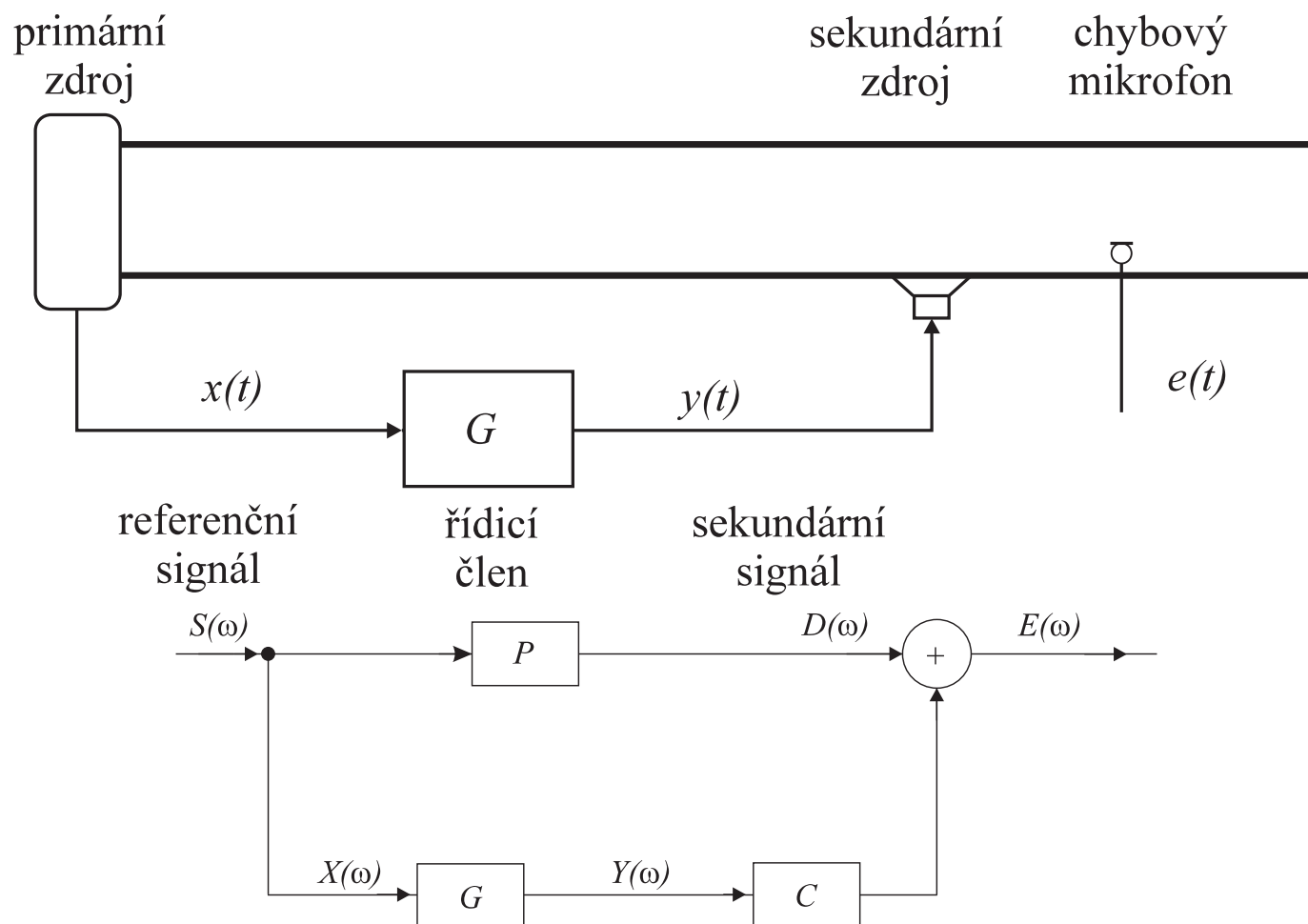
$$E(\omega) = D(\omega) \frac{1}{1 - G(j\omega)C(j\omega)}$$

$$S_{ee}(\omega) = S_{dd}(\omega) \frac{1}{|1 - G(j\omega)C(j\omega)|^2}.$$



Strategie aktivního řízení zvukových polí

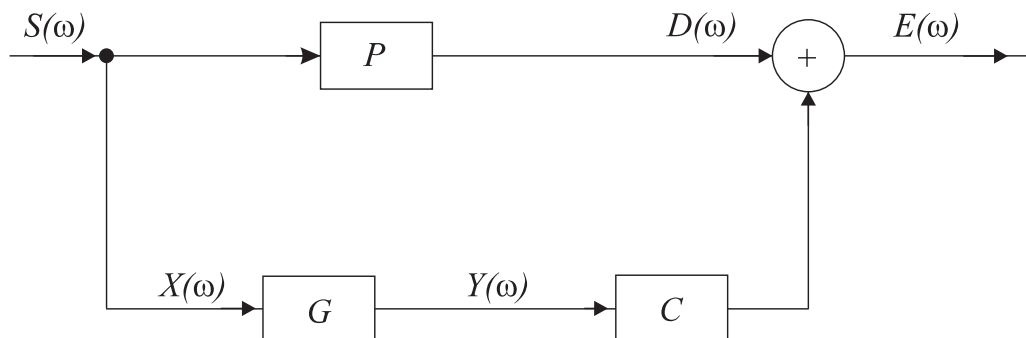
„Feedforward“ strategie





Strategie aktivního řízení zvukových polí

„Feedforward“ strategie



$$E(\omega) = D(\omega) + G(j\omega)C(j\omega)X(\omega).$$

$$D(\omega) = P(j\omega)S(\omega)$$

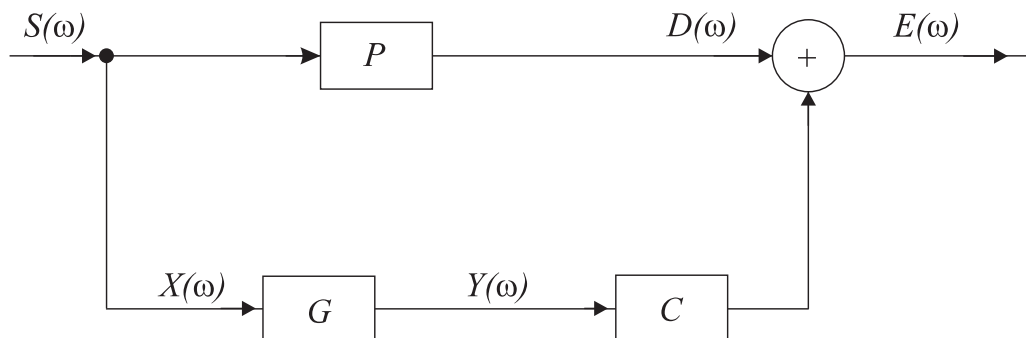
System bez šumu: $X(\omega) = S(\omega)$

$$E(\omega) = [P(j\omega) + G(j\omega)C(j\omega)]S(\omega)$$



Strategie aktivního řízení zvukových polí

„Feedforward“ strategie



$$E(\omega) = [P(j\omega) + G(j\omega)C(j\omega)]S(\omega)$$

Z požadavku $E(\omega) = 0$ v místě chybového mikrofону plyne

$$G(j\omega) = -\frac{P(j\omega)}{C(j\omega)}$$



Krátká rekapitulace adaptivních algoritmů

FIR filtry

$$y(n) = \sum_{i=0}^{l-1} g_i x(n-i)$$

1. Pro konečné koeficienty jsou vždy stabilní.
2. Fázová odezva odpovídá prostému zpoždění – jejich fáze je lineární.
3. Změny frekvenční odezvy způsobené malými změnami koeficientů jsou malé a snadno predikovatelné.



Krátká rekapitulace adaptivních algoritmů

IIR filtry

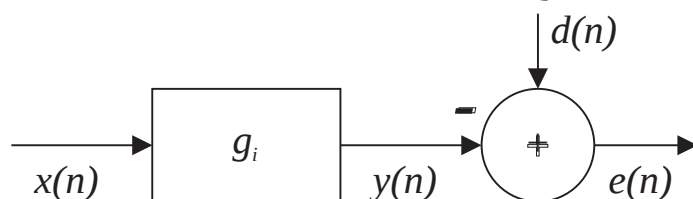
$$y(n) = \sum_{i=0}^{I-1} g_i x(n-i) + \sum_{k=1}^K b_k y(n-k)$$

1. Nemusí být vždy stabilní.
2. Jejich fáze nemůže být lineární.
3. Malé změny koeficientů b_k mohou způsobit velké změny frekvenční odezvy.



Krátká rekapitulace adaptivních algoritmů

Adaptivní filtry



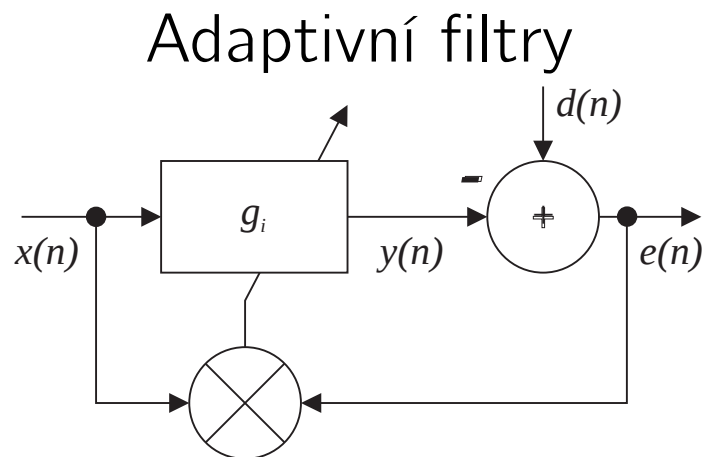
$$e(n) = d(n) - \sum_{i=0}^{l-1} g_i x(n-i)$$

$$\frac{\partial E[e^2(n)]}{\partial g_k} = 2E \left[e(n) \frac{\partial e(n)}{\partial g_k} \right] = -2E[e(n)x(n-k)]$$

$$g_i(n+1) = g_i(n) - \mu \frac{\partial E[e^2(n)]}{\partial g_i} \Big|_{g_i=g_i(n)}$$



Krátká rekapitulace adaptivních algoritmů

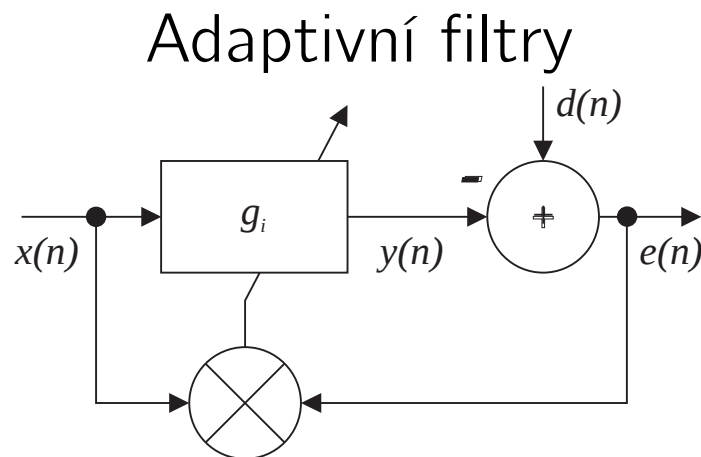


$$g_i(n+1) = g_i(n) + \alpha e(n)x(n-i), \quad \text{pro všechna } i$$

$$0 < \alpha < \frac{1}{E[x^2(n)]}$$



Krátká rekapitulace adaptivních algoritmů



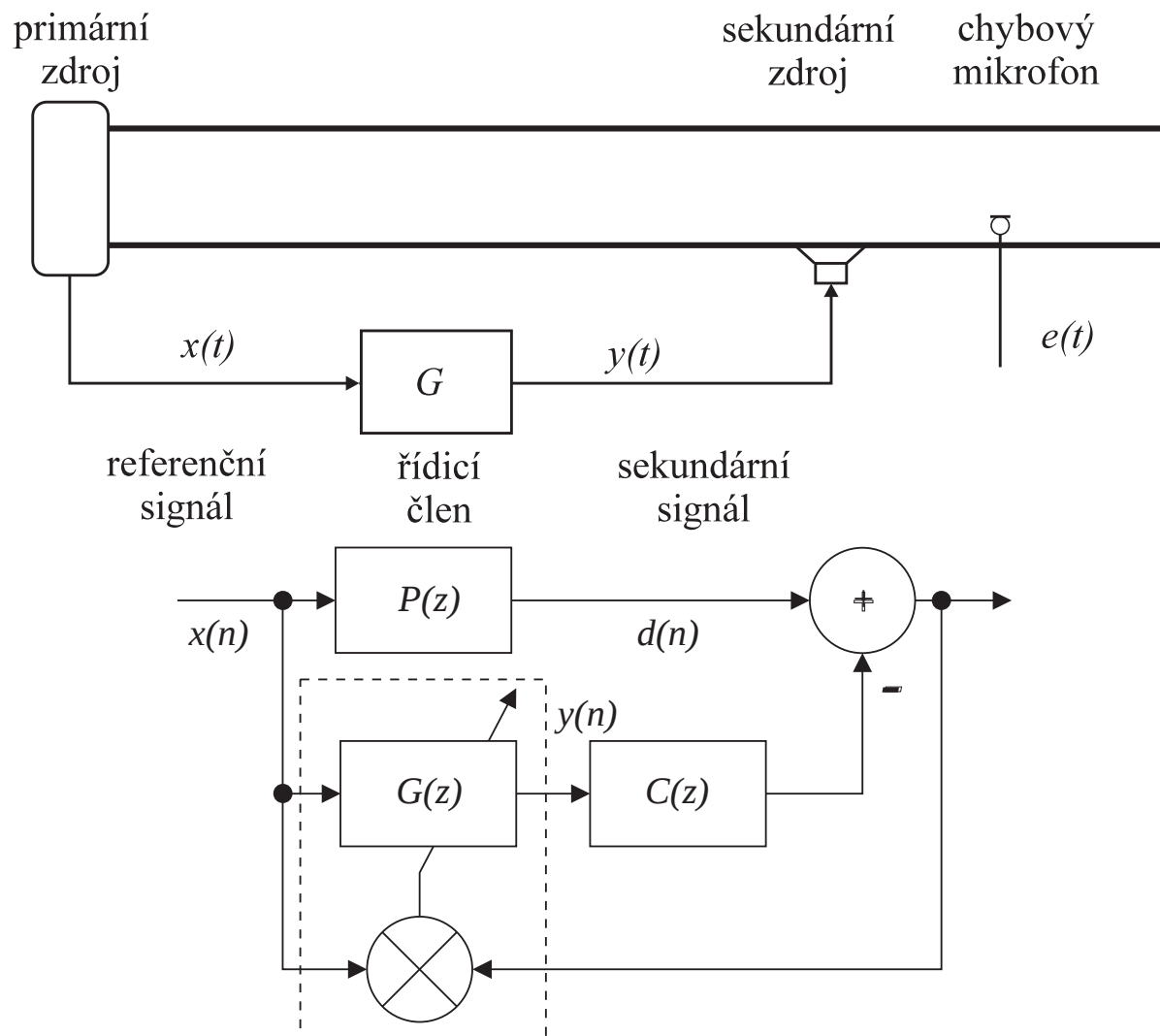
$$g_i(n+1) = g_i(n) + \alpha e(n)x(n-i), \quad \text{pro všechna } i$$

$$0 < \alpha < \frac{1}{E[x^2(n)]}$$

Wiener a Hoff – LMS



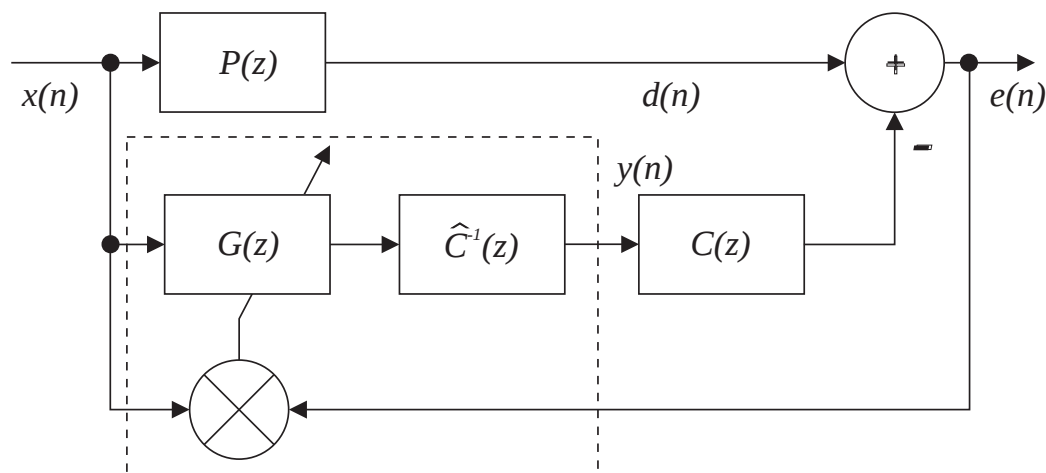
Aktivní systém s LMS adaptací





Aktivní systém s LMS adaptací

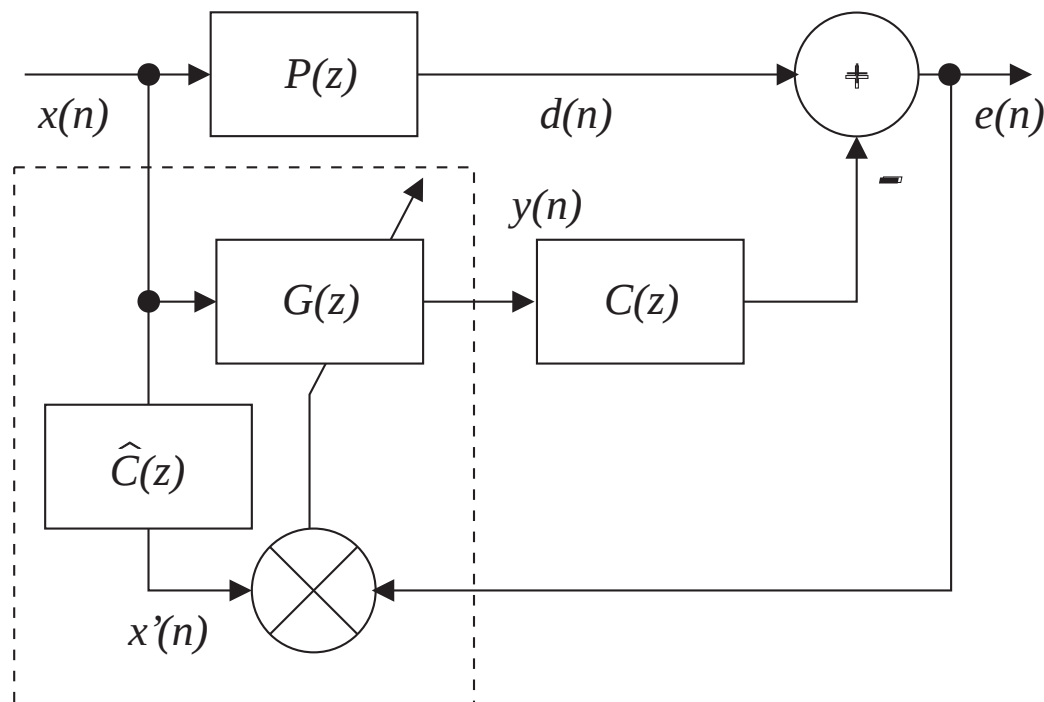
Kompenzace chybové cesty



$\hat{C}^{-1}(z)$ nelze realizovat širokopásmově



Aktivní systém s LMS adaptací



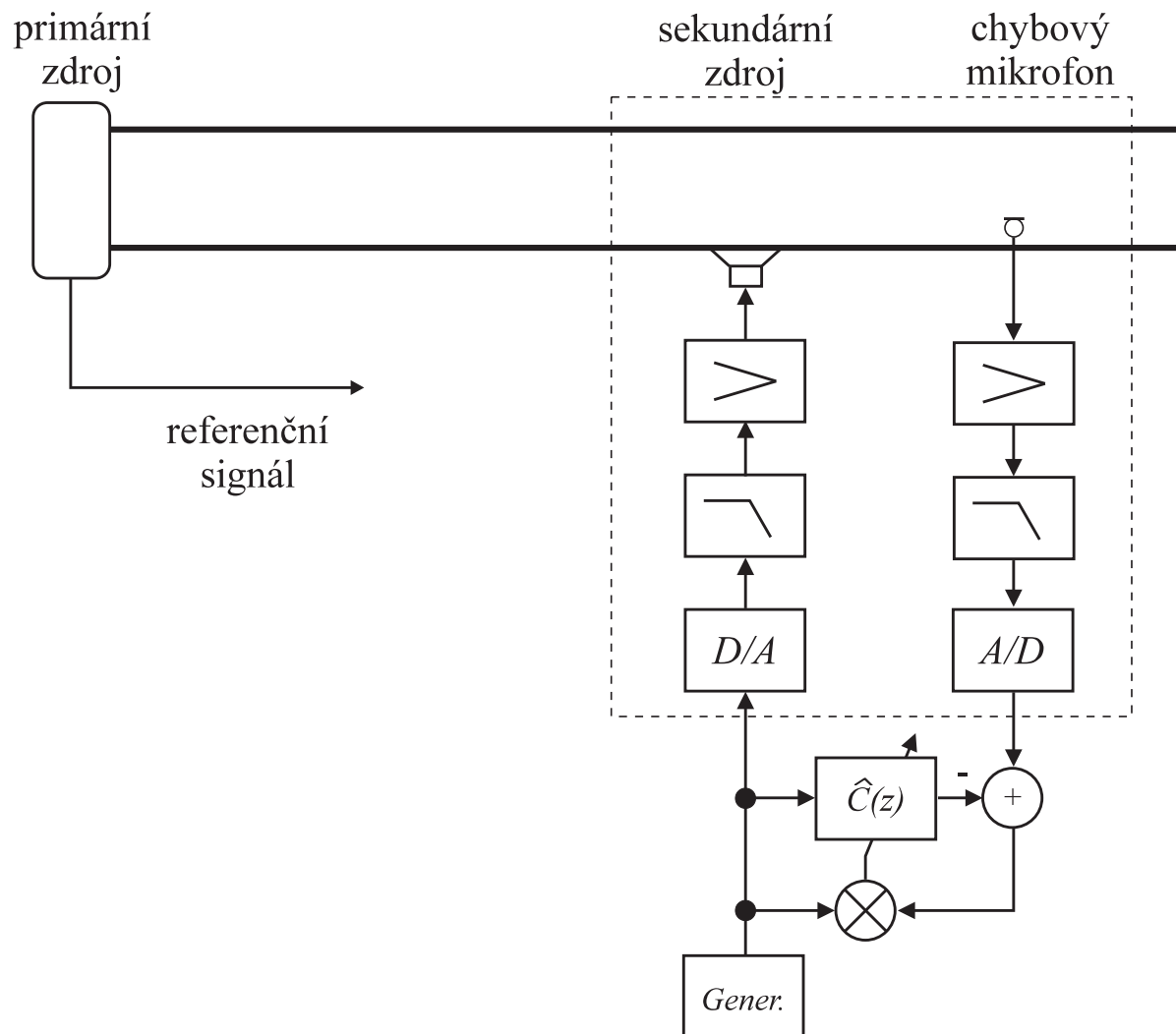
$$g_i(n+1) = g_i + \alpha e(n)x'(n-i)$$

Widrow a Burgess (1981) – FXLMS (filtered-x LMS)



Identifikace systému

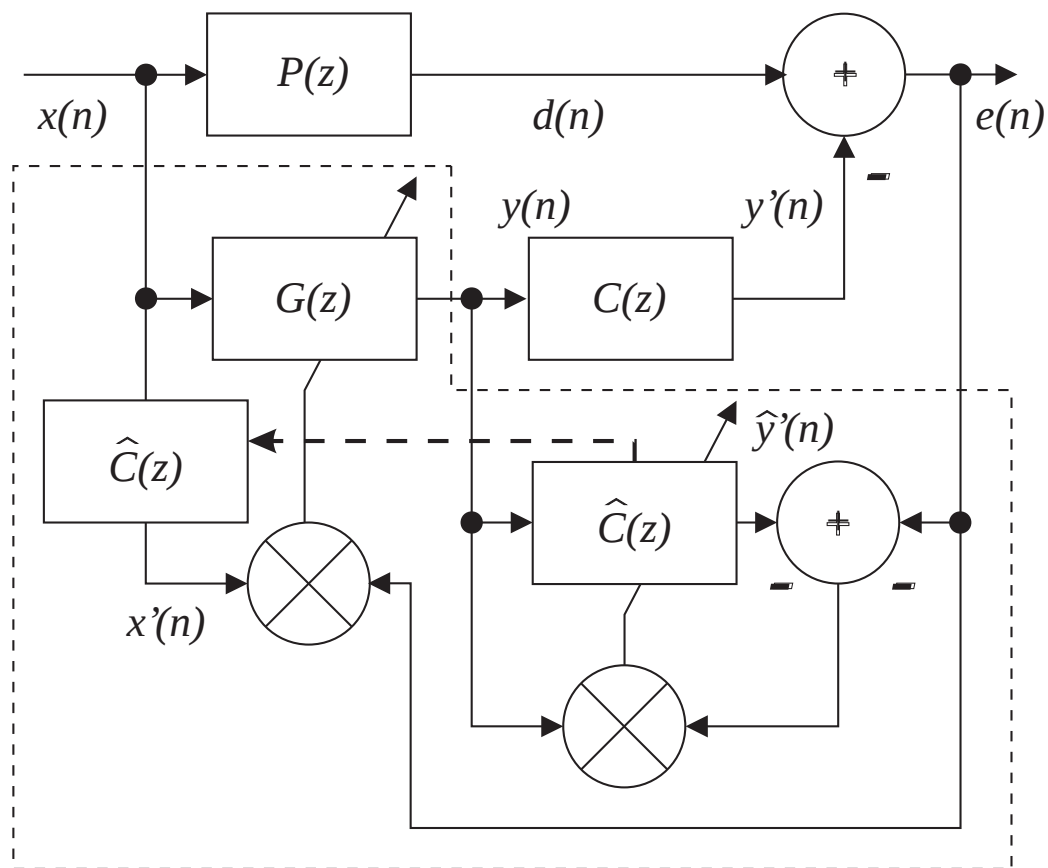
Off-line identifikace





Identifikace systému

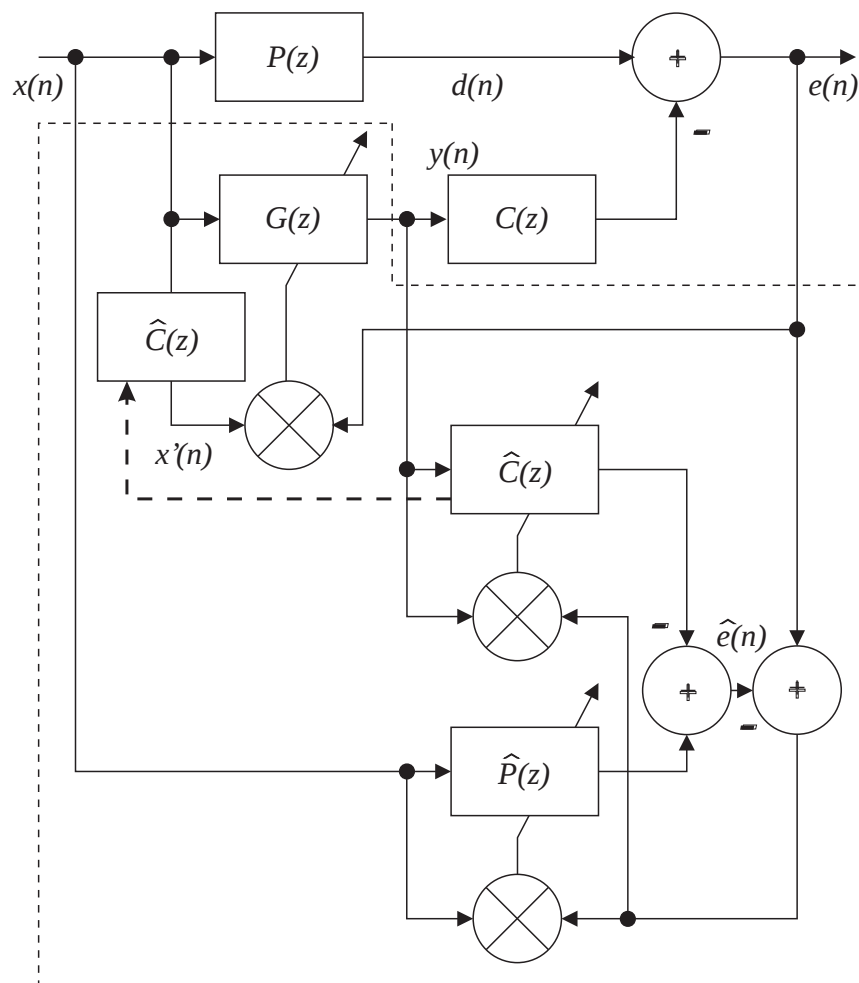
On-line identifikace – Widrow a Stearns





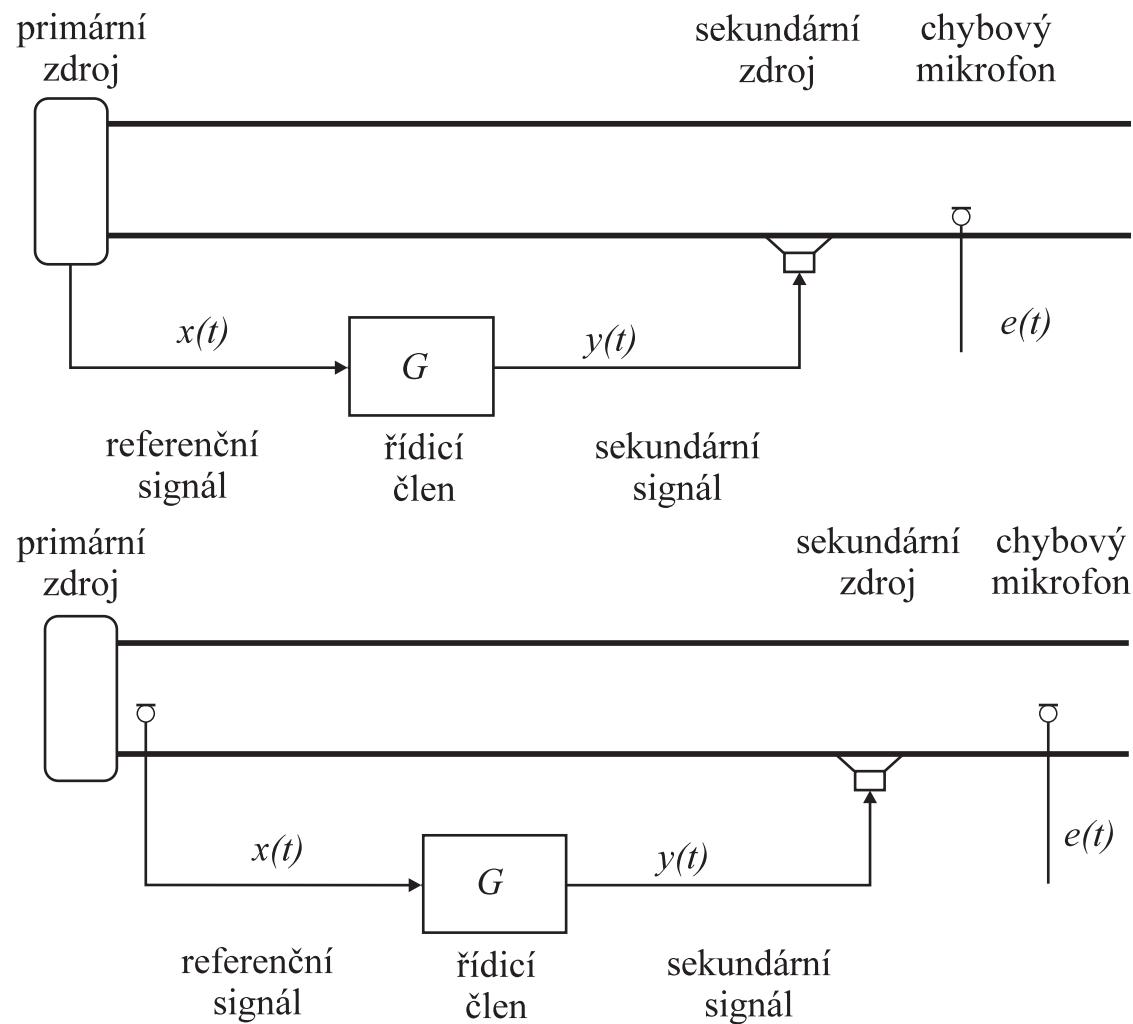
Identifikace systému

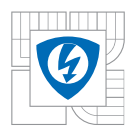
Úplná on-line identifikace



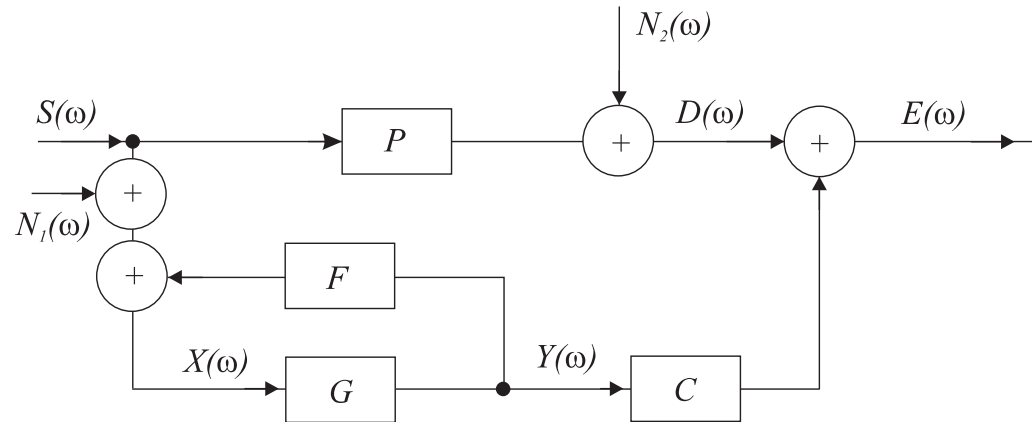


Akustická zpětná vazba



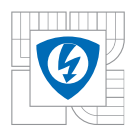


Akustická zpětná vazba

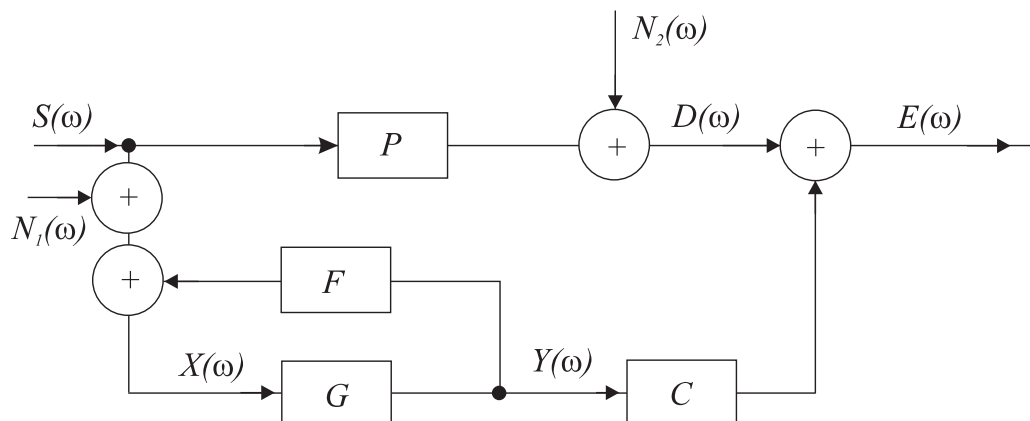


$$X(\omega) = S(\omega) + F(j\omega)Y(\omega) + N_1(\omega)$$

$$E(\omega) = P(j\omega)S(\omega) + C(j\omega)Y(\omega) + N_2(\omega)$$



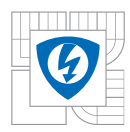
Akustická zpětná vazba



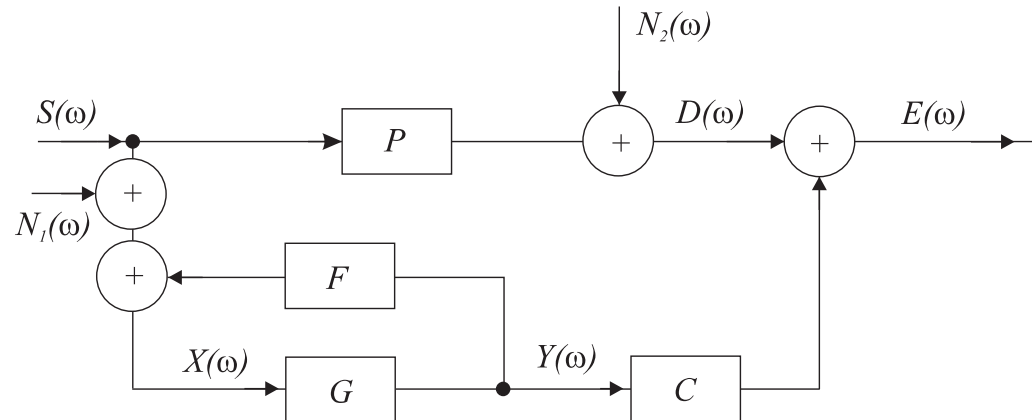
Pro systém bez šumu:

$$Y(\omega) = G(j\omega)X(\omega), \quad X(\omega) = \frac{S(\omega)}{1 - F(j\omega)G(j\omega)}$$

$$E(\omega) = S(\omega) \left[P(j\omega) + \frac{C(j\omega)G(j\omega)}{1 - F(j\omega)G(j\omega)} \right]$$

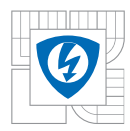


Akustická zpětná vazba

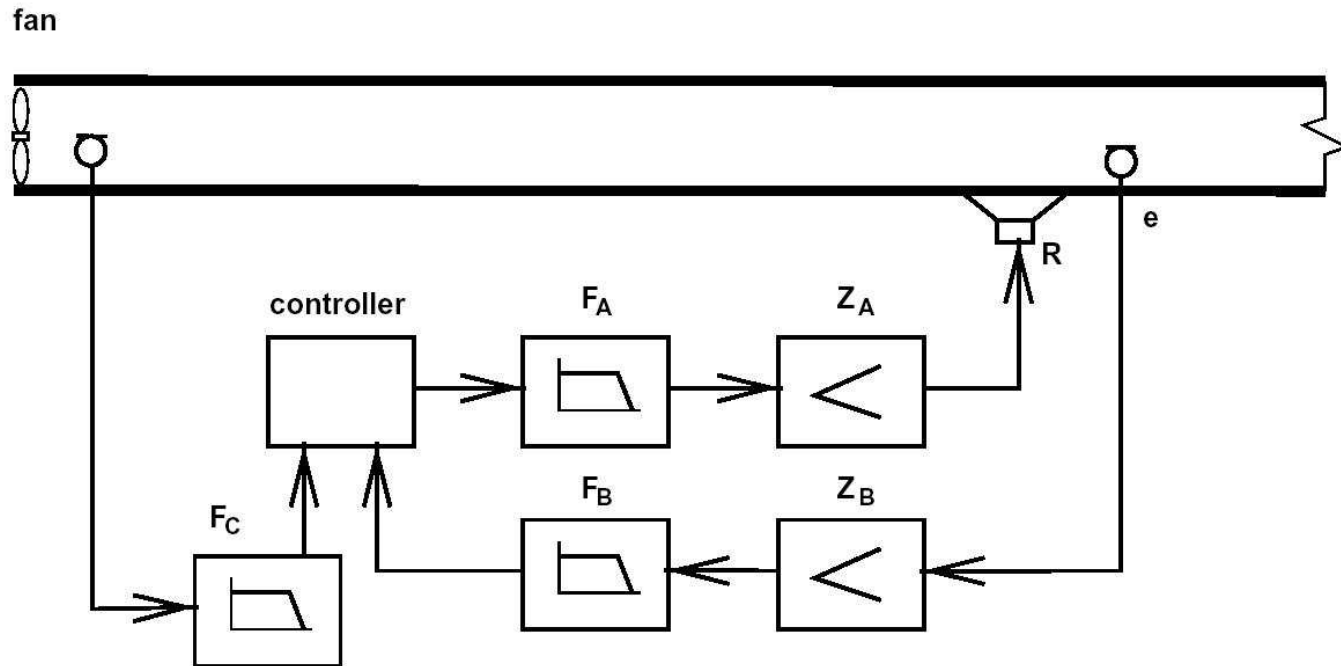


Z požadavku $E(\omega) = 0$ v místě chybového mikrofonu plyne

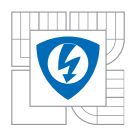
$$G(j\omega) = -\frac{P(j\omega)}{C(j\omega) - P(j\omega)F(j\omega)}$$



Metody polačení akustické zpětné vazby

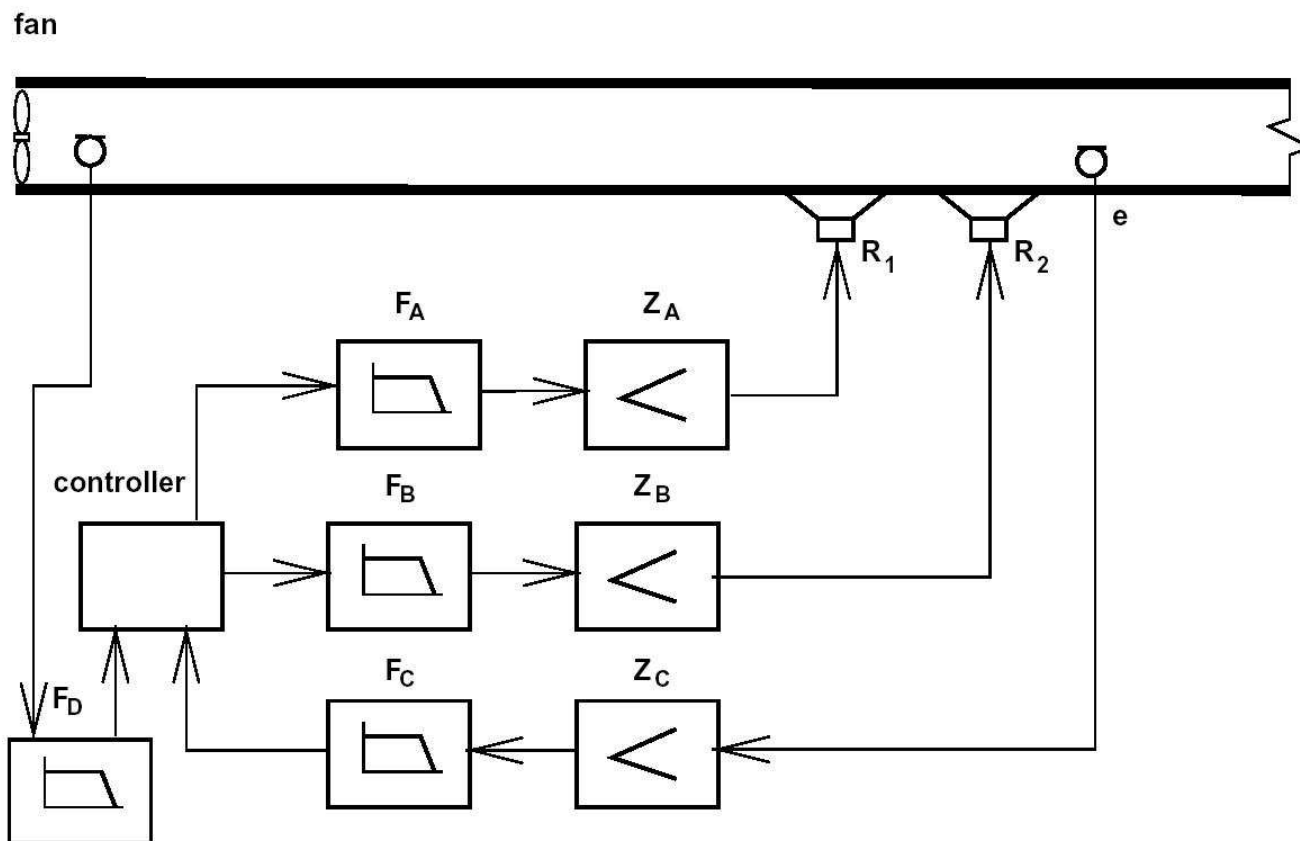


- Směrové mikrofony
- Směrové sekundární zdroje
- Vhodný kompenzační algoritmus



Metody polačení akustické zpětné vazby

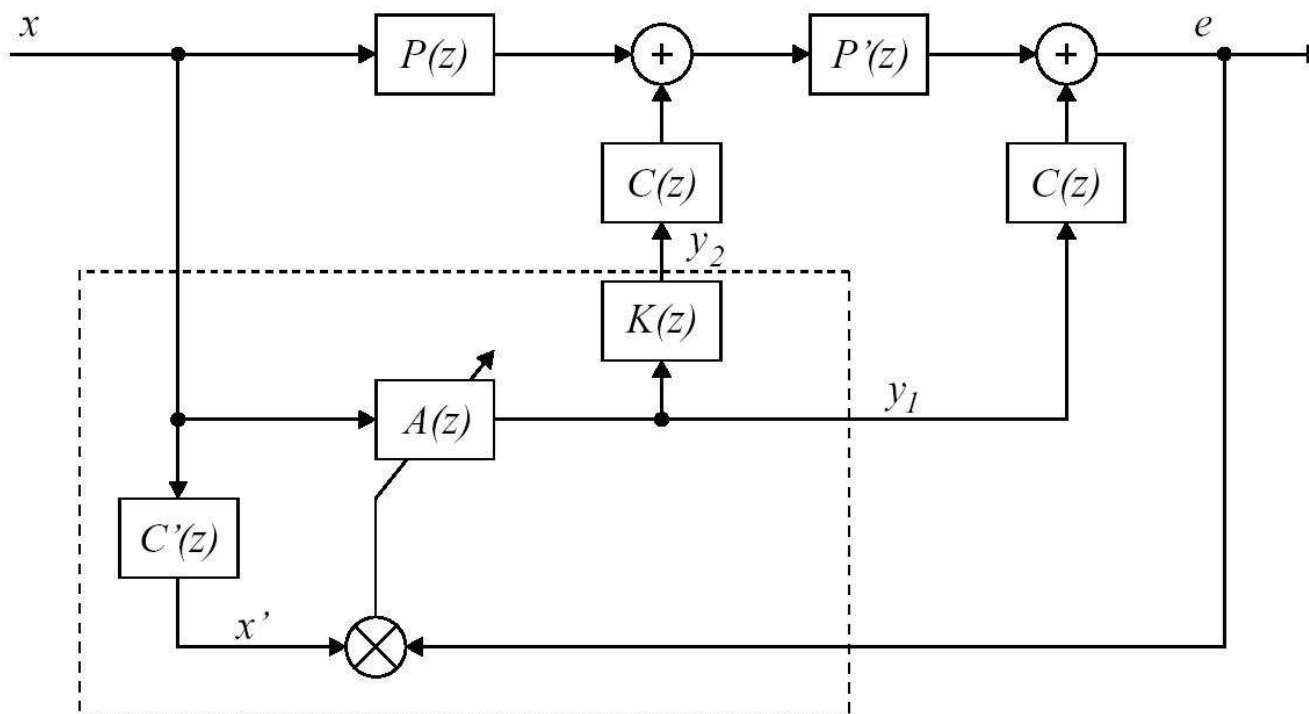
Swinbanksův zdroj





Metody polačeni akustické zpětné vazby

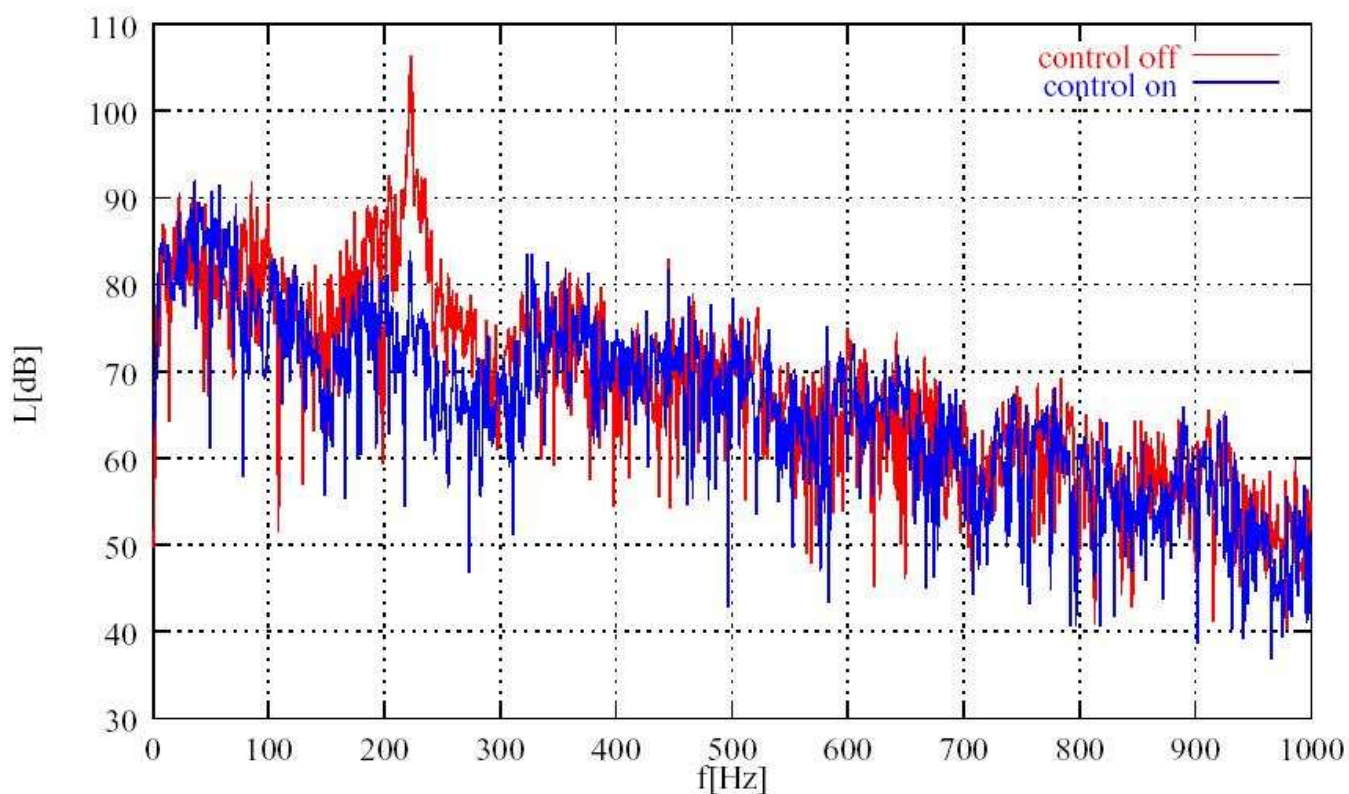
Swinbanksův zdroj





Metody polačení akustické zpětné vazby

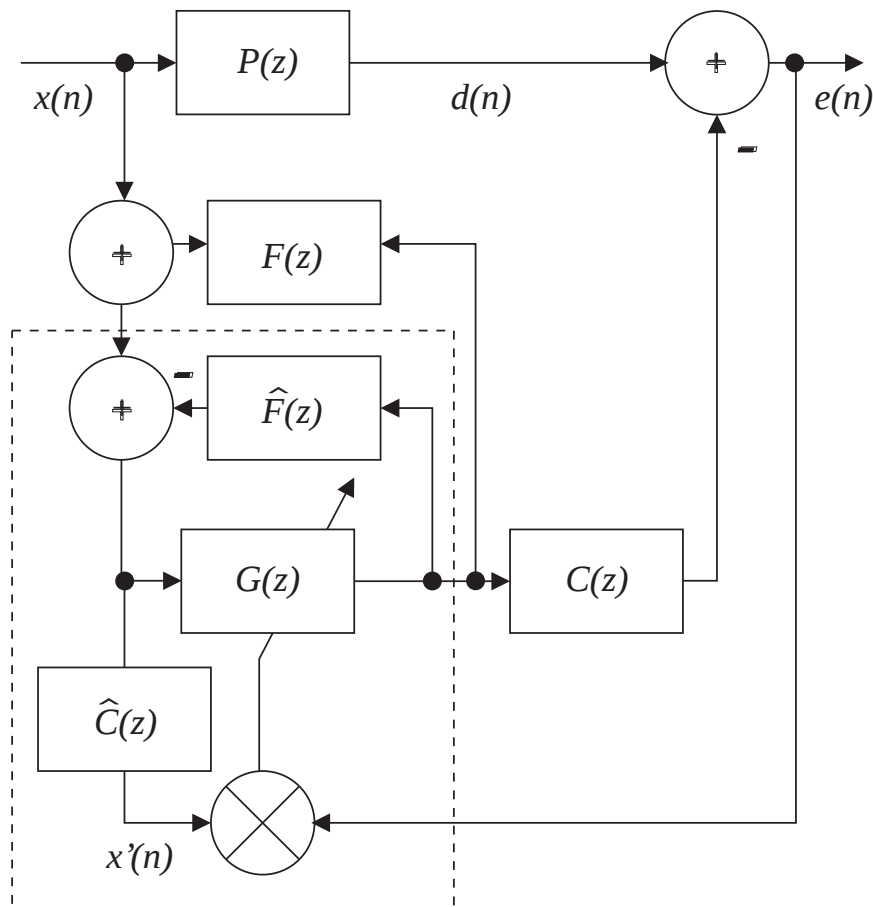
Swinbanksův zdroj

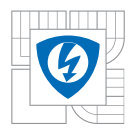




Metody polačení akustické zpětné vazby

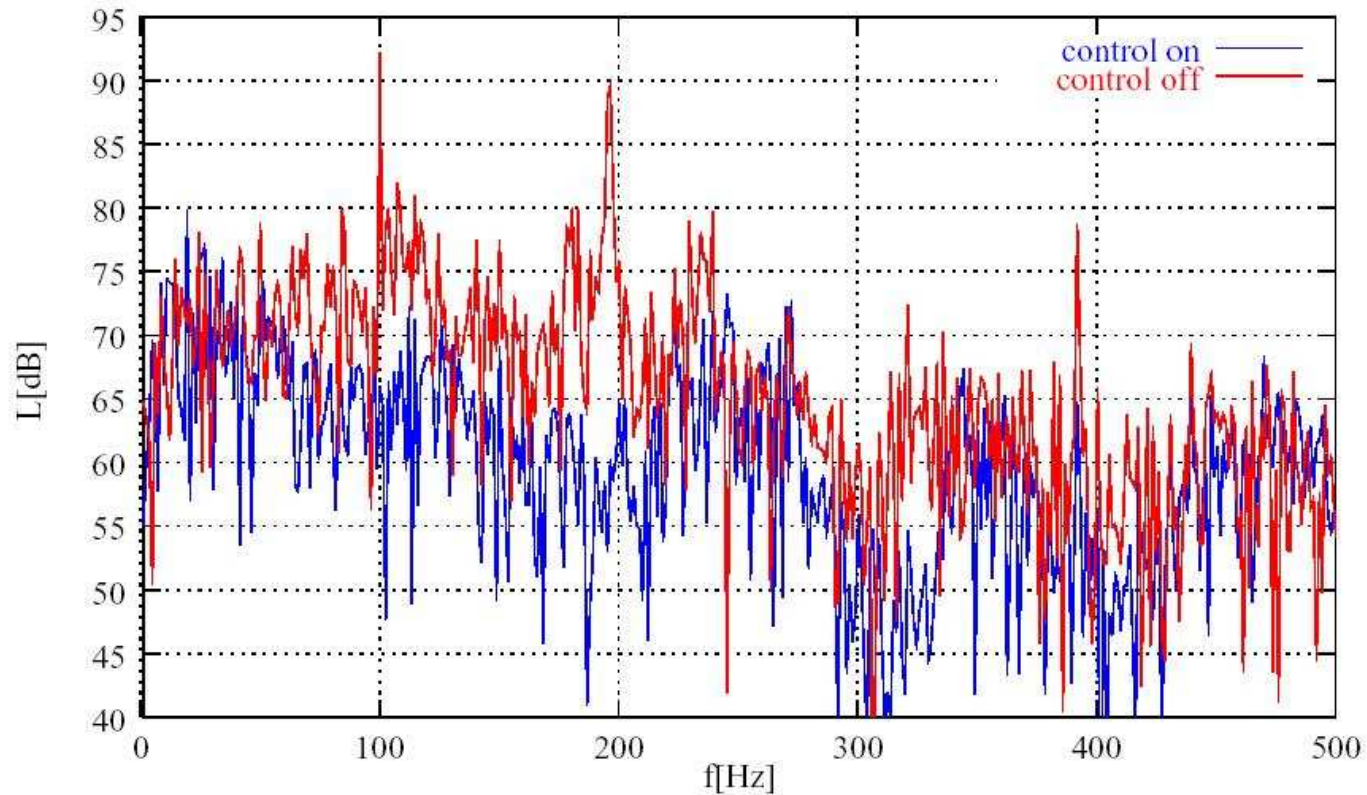
Kompenzace zpětné vazby pevným filtrem





Metody polačení akustické zpětné vazby

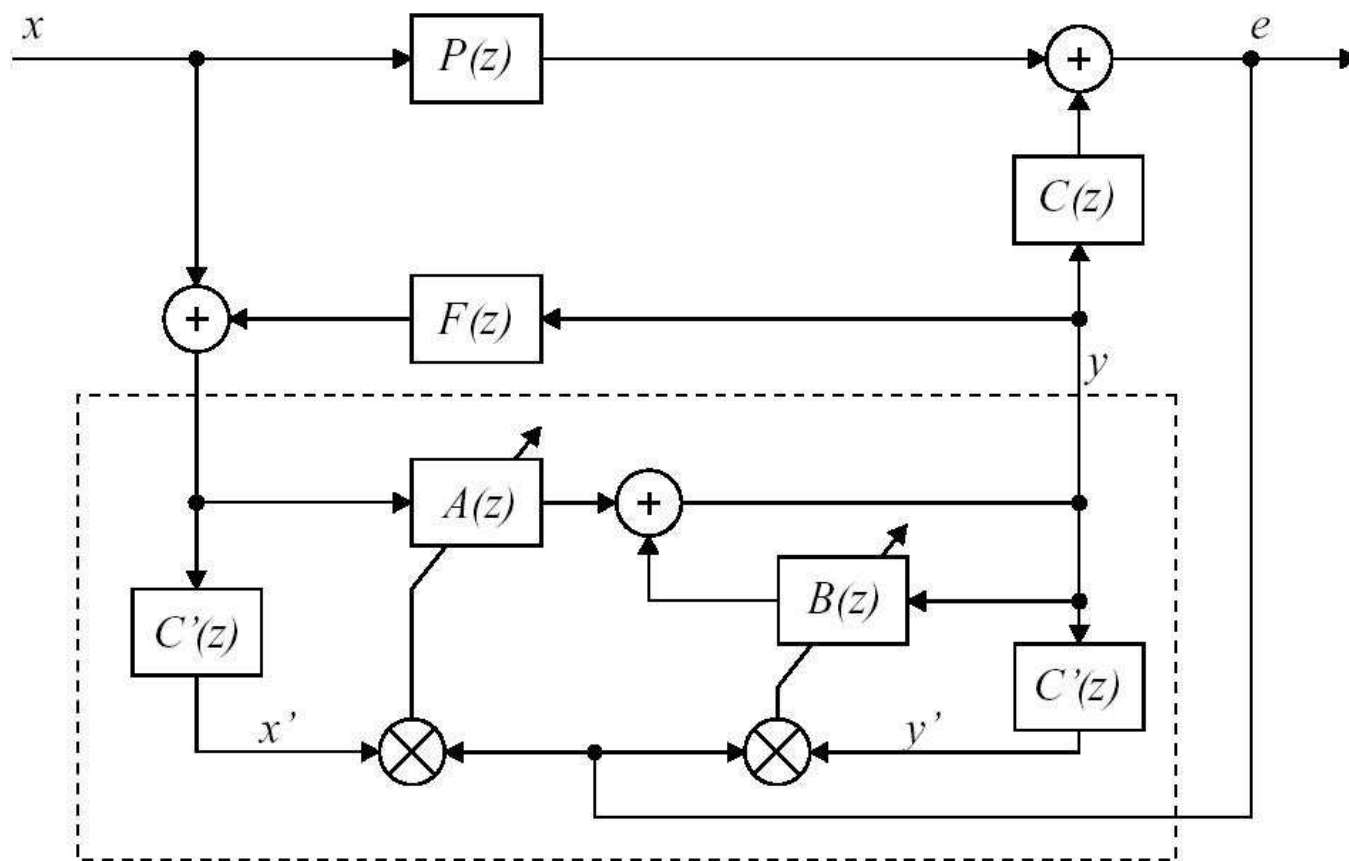
Kompenzace zpětné vazby pevným filtrem

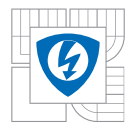




Metody polačení akustické zpětné vazby

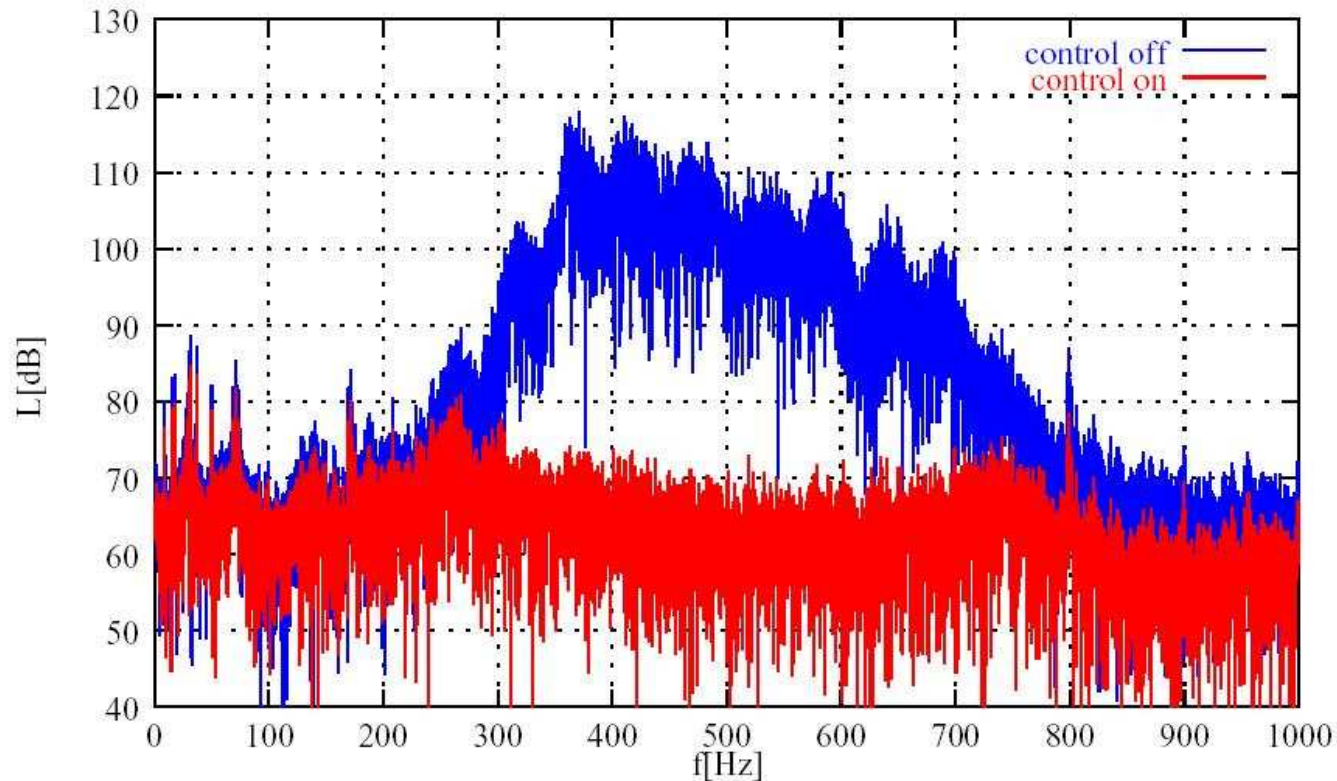
Kompenzace zpětné vazby adaptivním filtrem





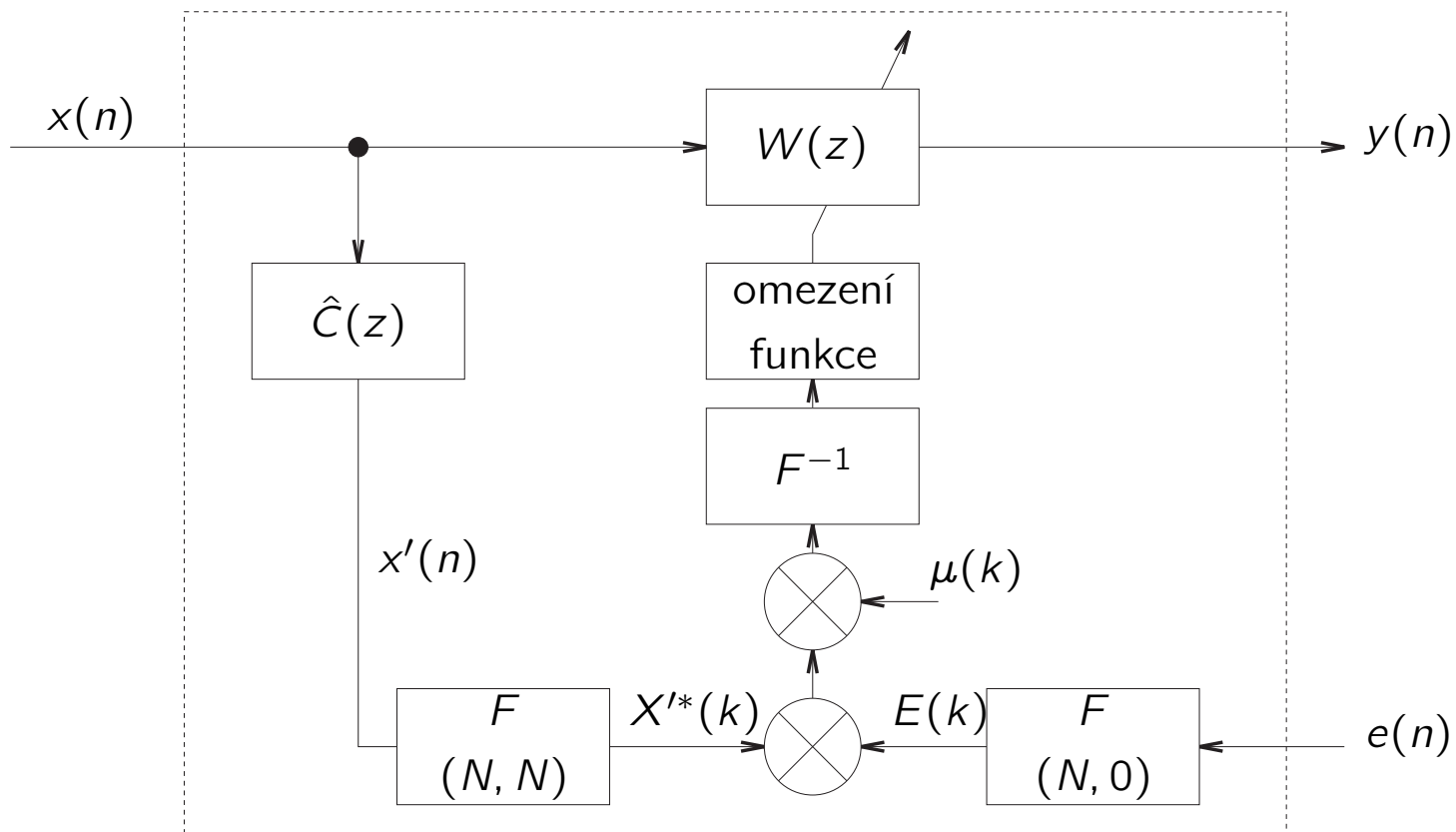
Metody polačení akustické zpětné vazby

Kompenzace zpětné vazby adaptivním filtrem





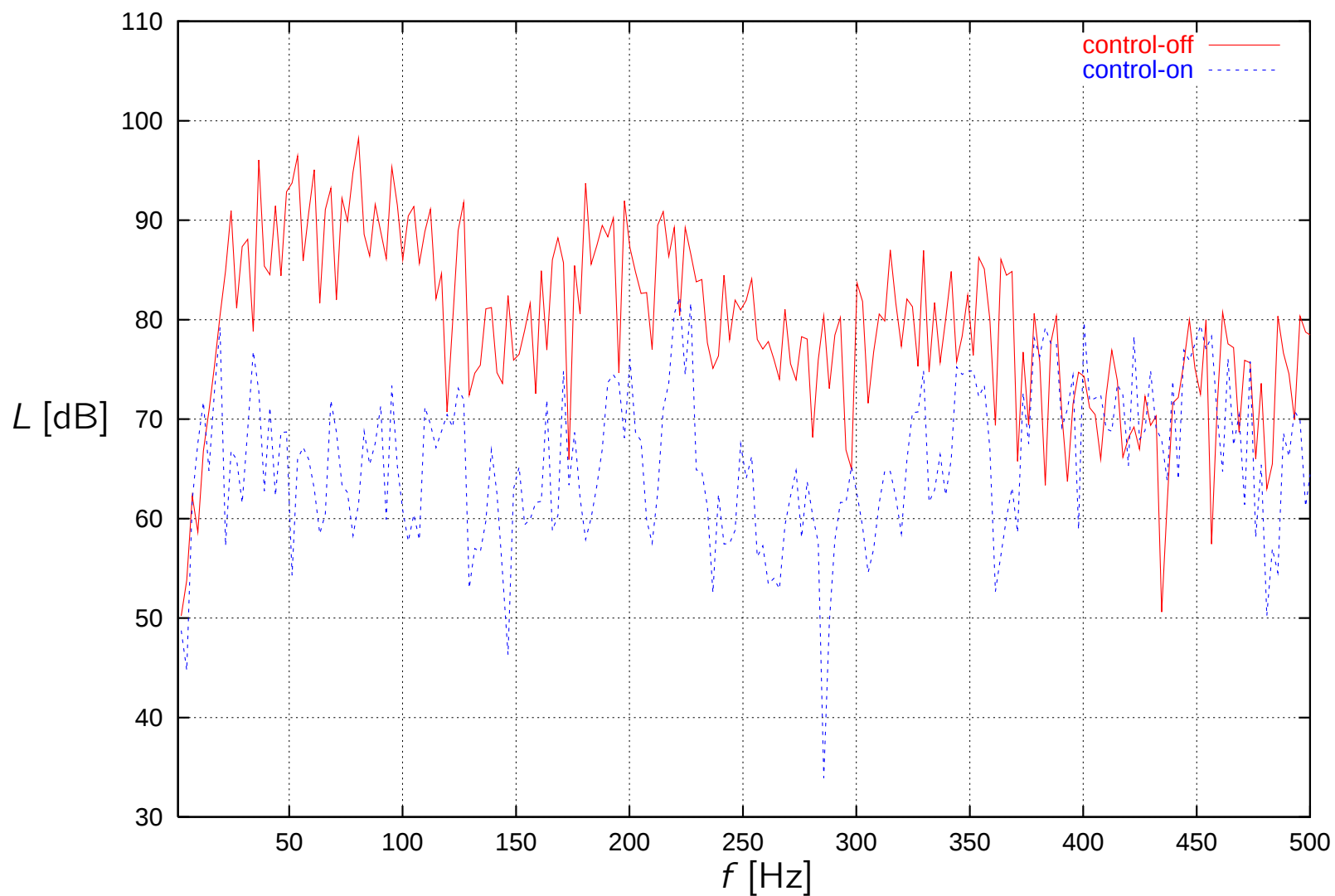
x-LMS v kmitočtové oblasti

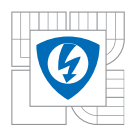


$$w_i(m+1) = w_i(m) + F^{-1} \{ \mu(k) X_m^*(k) E_m(k) \}_+$$



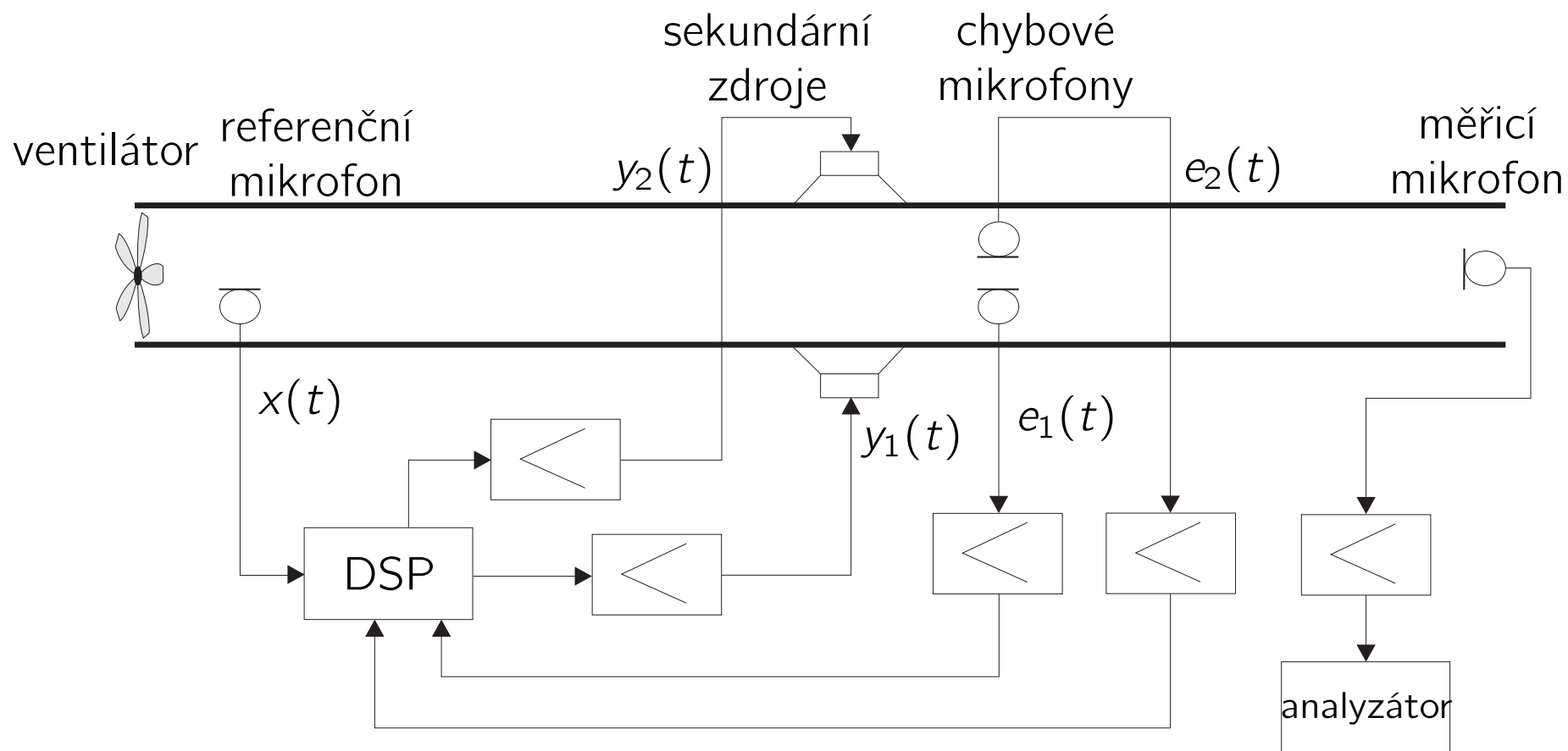
x-LMS v kmitočtové oblasti





Aktivní řízení zvuku v 3D

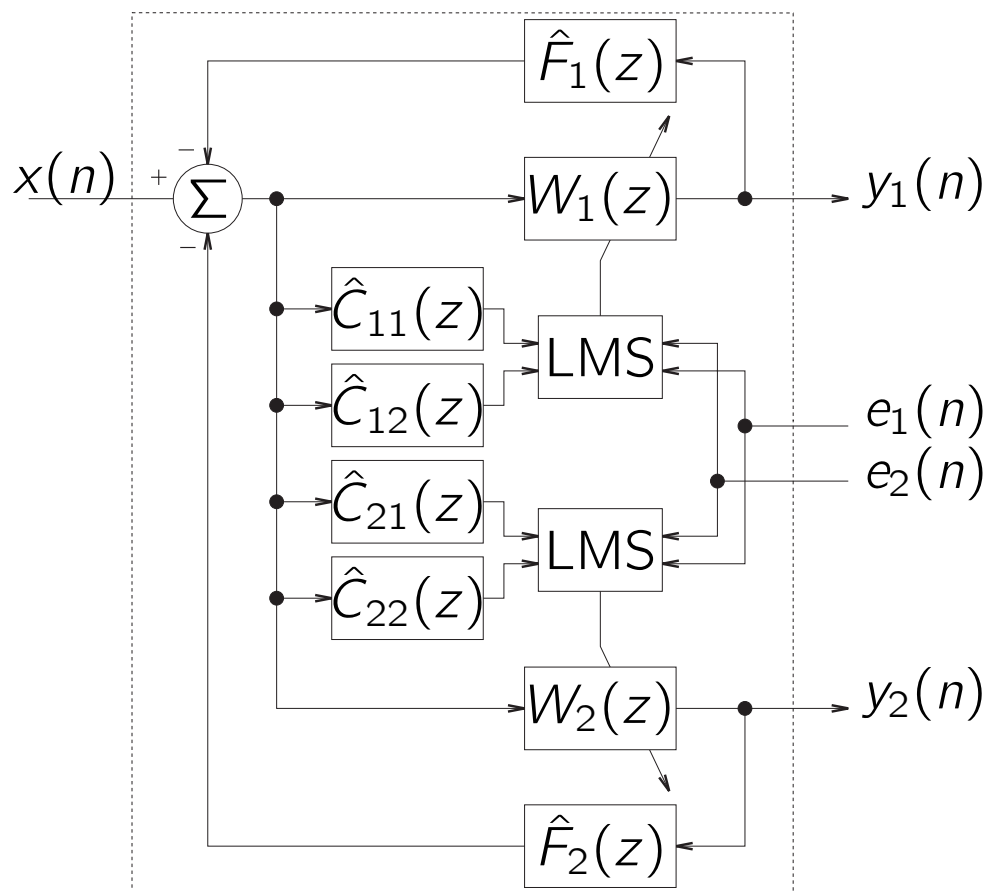
Dvoukanálový systém v potrubí





Aktivní řízení zvuku v 3D

Dvoukanálový systém v potrubí





Aktivní řízení zvuku v 3D

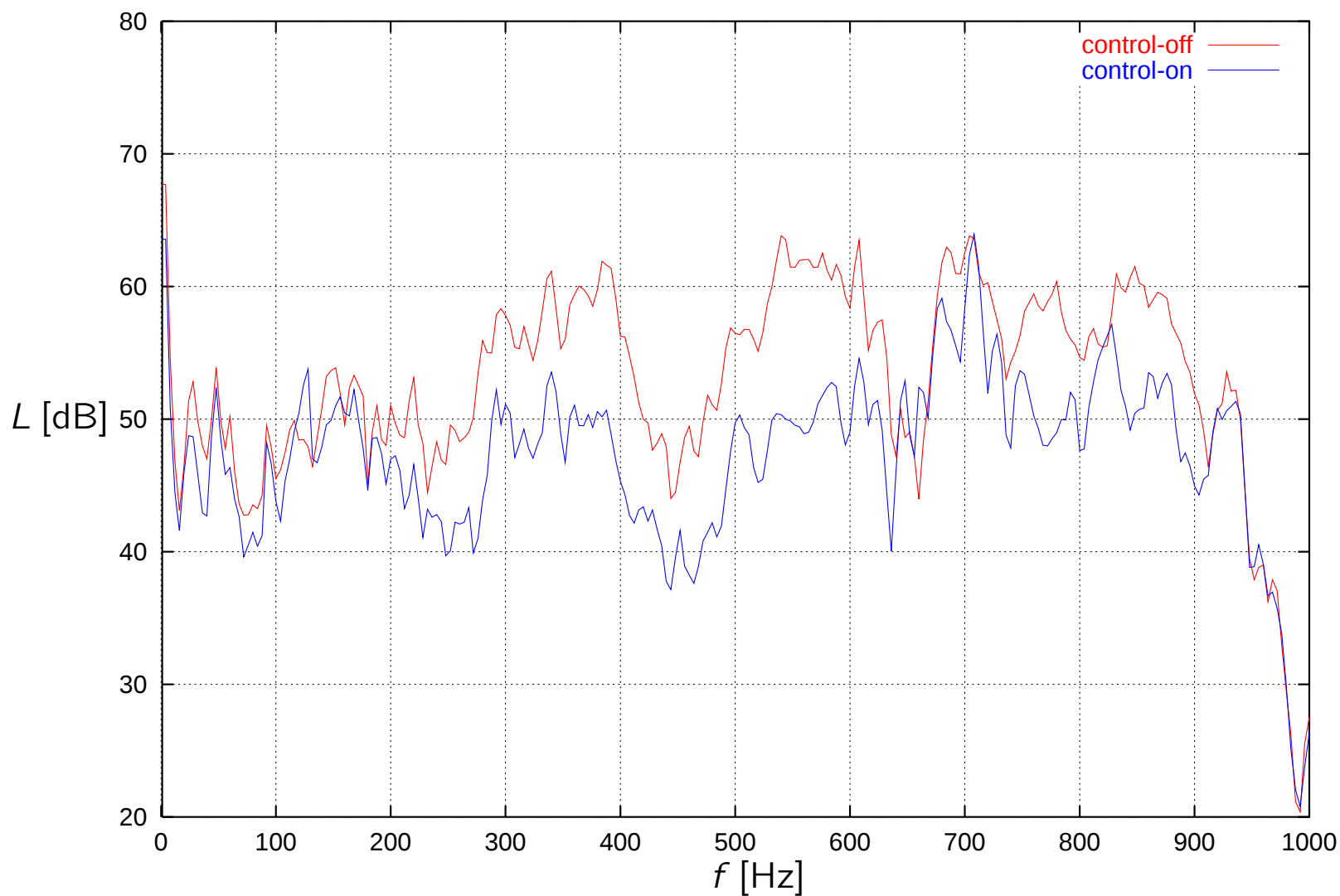
Dvoukanálový systém v potrubí

$$\mathbf{w}_1(n+1) = \mathbf{w}_1(n) + \mu_1 \mathbf{x}'_{11}(n)e_1(n) + \mu_2 \mathbf{x}'_{12}(n)e_2(n)$$

$$\mathbf{w}_2(n+1) = \mathbf{w}_2(n) + \mu_2 \mathbf{x}'_{21}(n)e_1(n) + \mu_1 \mathbf{x}'_{22}(n)e_2(n)$$



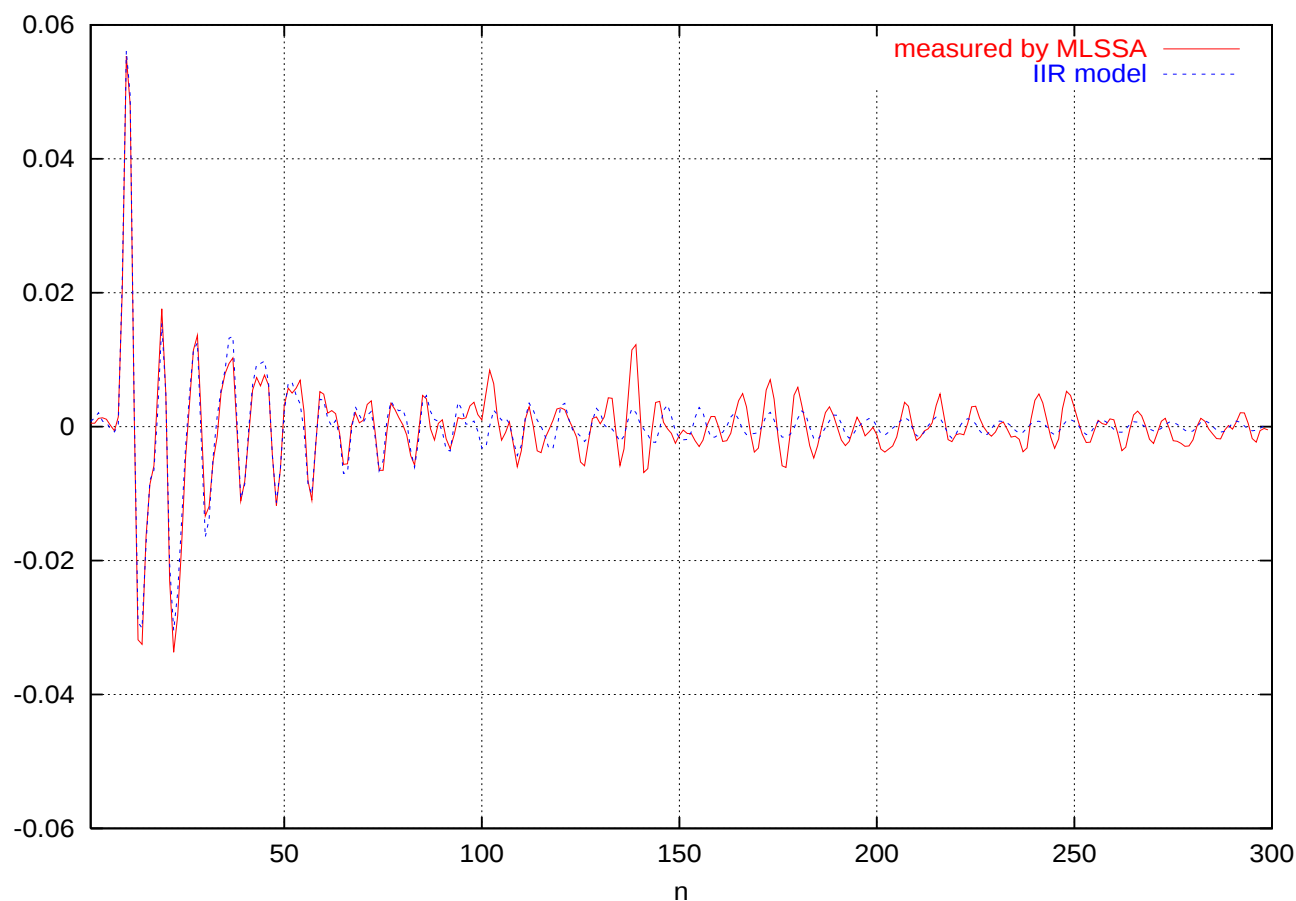
Aktivní řízení zvuku v 3D





Aktivní řízení zvuku v 3D

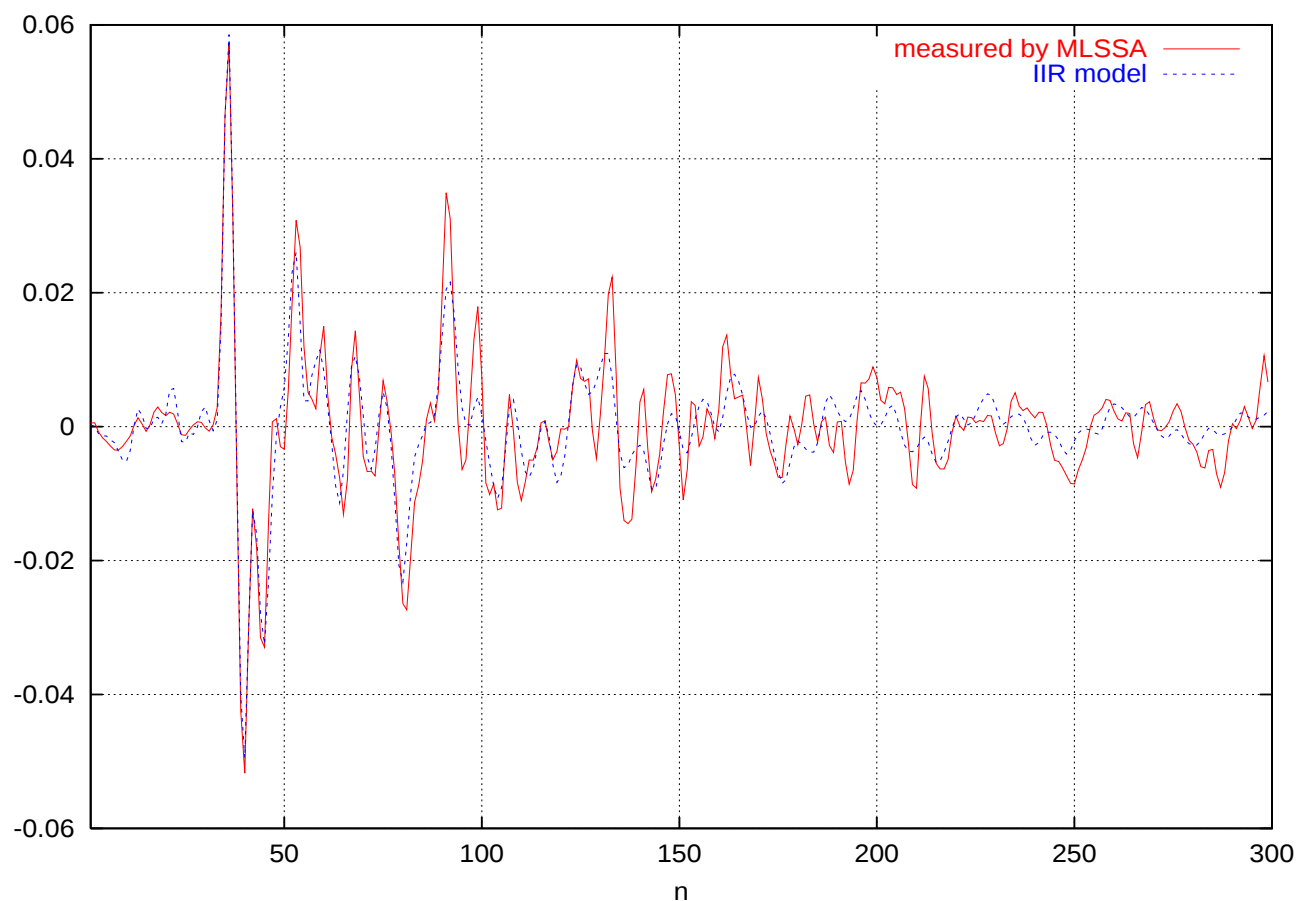
$c_{11}(n), \hat{c}_{11}(n)$

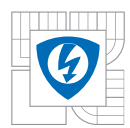




Aktivní řízení zvuku v 3D

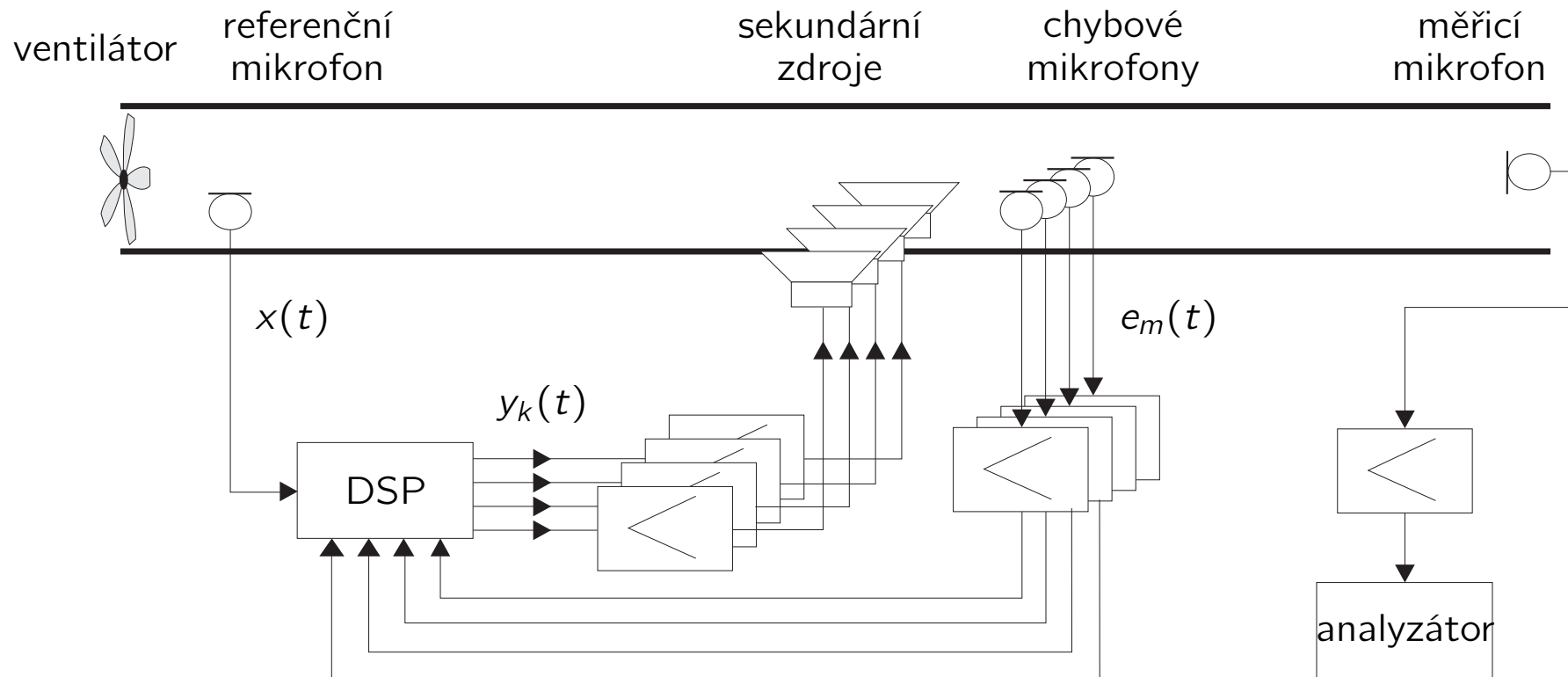
$f_1(n)$, $\hat{f}_1(n)$





Aktivní řízení zvuku v 3D

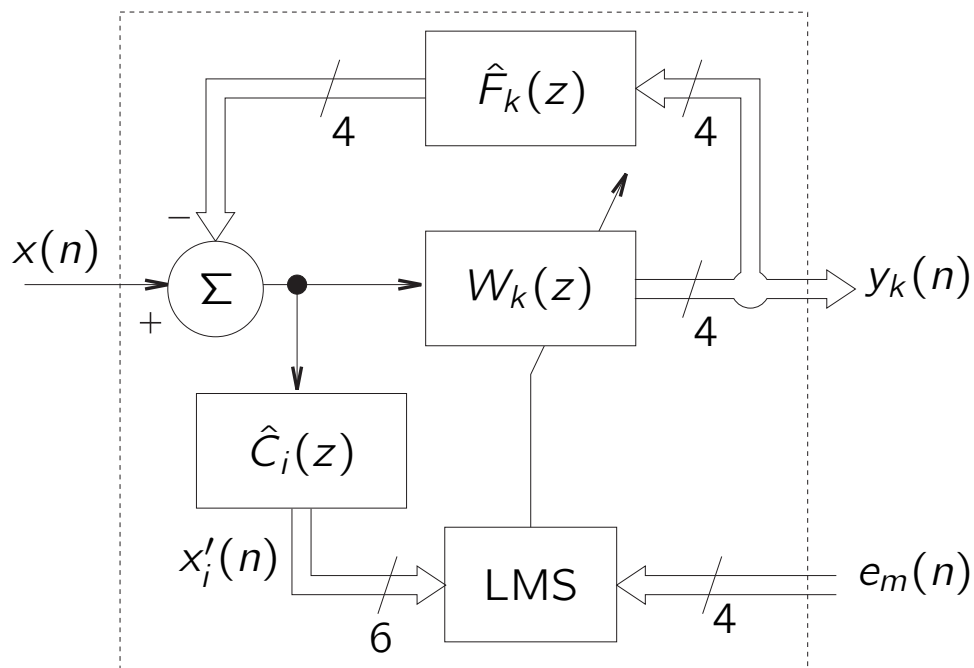
Čtyřkanálový systém v potrubí





Aktivní řízení zvuku v 3D

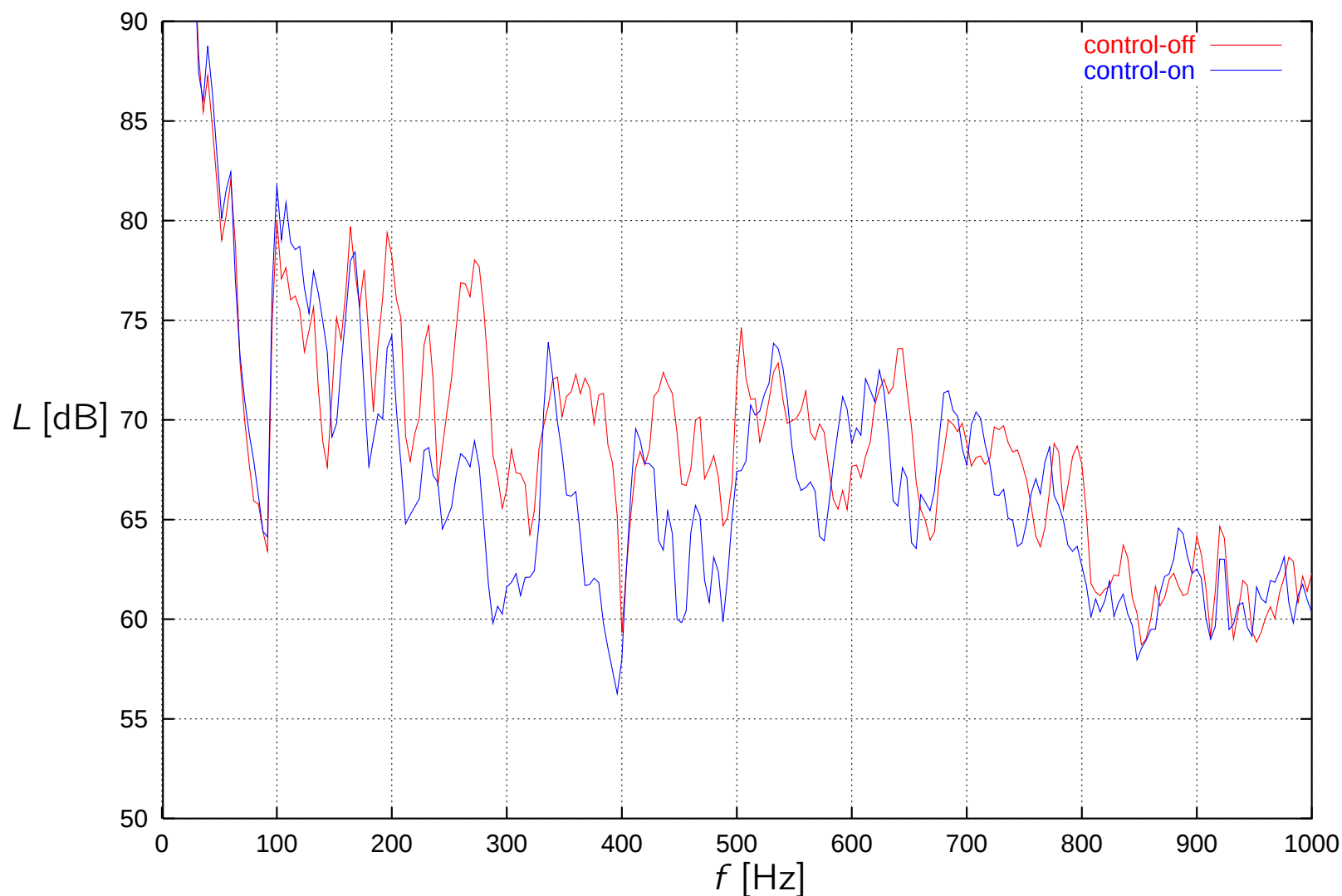
Čtyřkanálový systém v potrubí



$$\begin{aligned} \mathbf{w}_1(n+1) = & \mathbf{w}_1(n) + \mu_1 \mathbf{x}'_1(n) e_1(n) + \\ & + \mu_3 \mathbf{x}'_3(n) e_3(n) + \mu_5 \mathbf{x}'_5(n) [e_2(n) + e_4(n)] \end{aligned}$$



Aktivní řízení zvuku v 3D

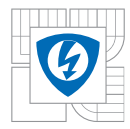




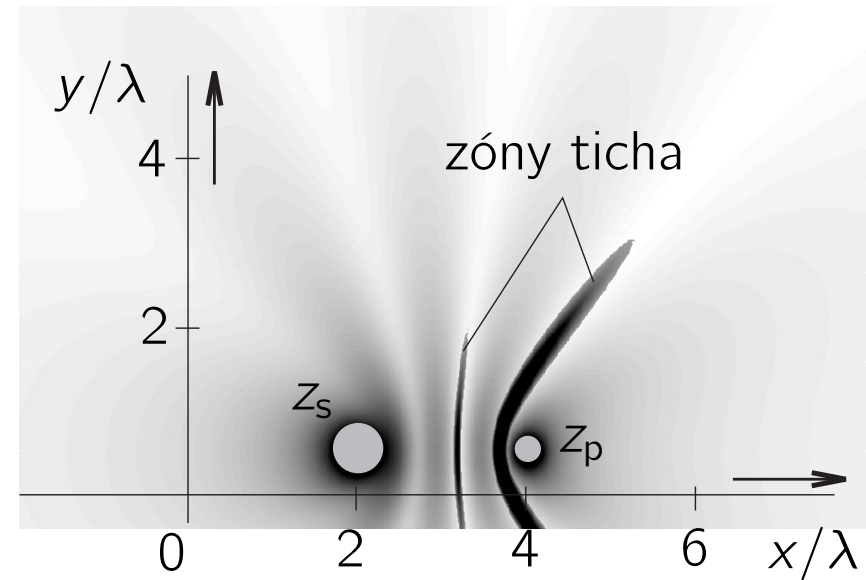
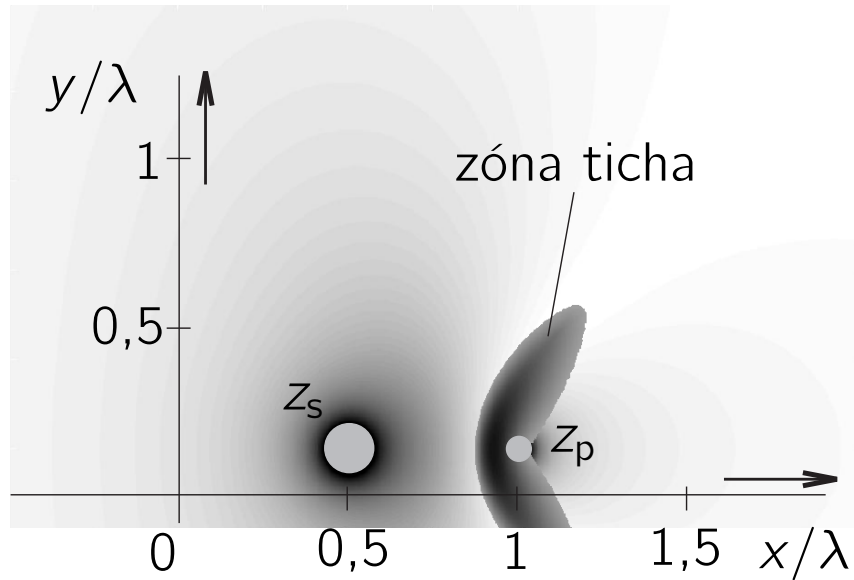
Aktivní řízení zvuku v 3D – Zóny ticha

$$p(\mathbf{x}) = \int_V Q_{vol}(\mathbf{y}) G(\mathbf{x}|\mathbf{y}) dV + \\ + \int_V [G(\mathbf{x}|\mathbf{y}) \nabla_y p(\mathbf{y}) - p(\mathbf{y}) \nabla_y G(\mathbf{x}|\mathbf{y})] \cdot \mathbf{n} dS$$

$$p(\mathbf{x}) = \frac{j\omega\rho_0 q \exp(-jk|\mathbf{x} - \mathbf{y}|)}{4\pi|\mathbf{x} - \mathbf{y}|}$$

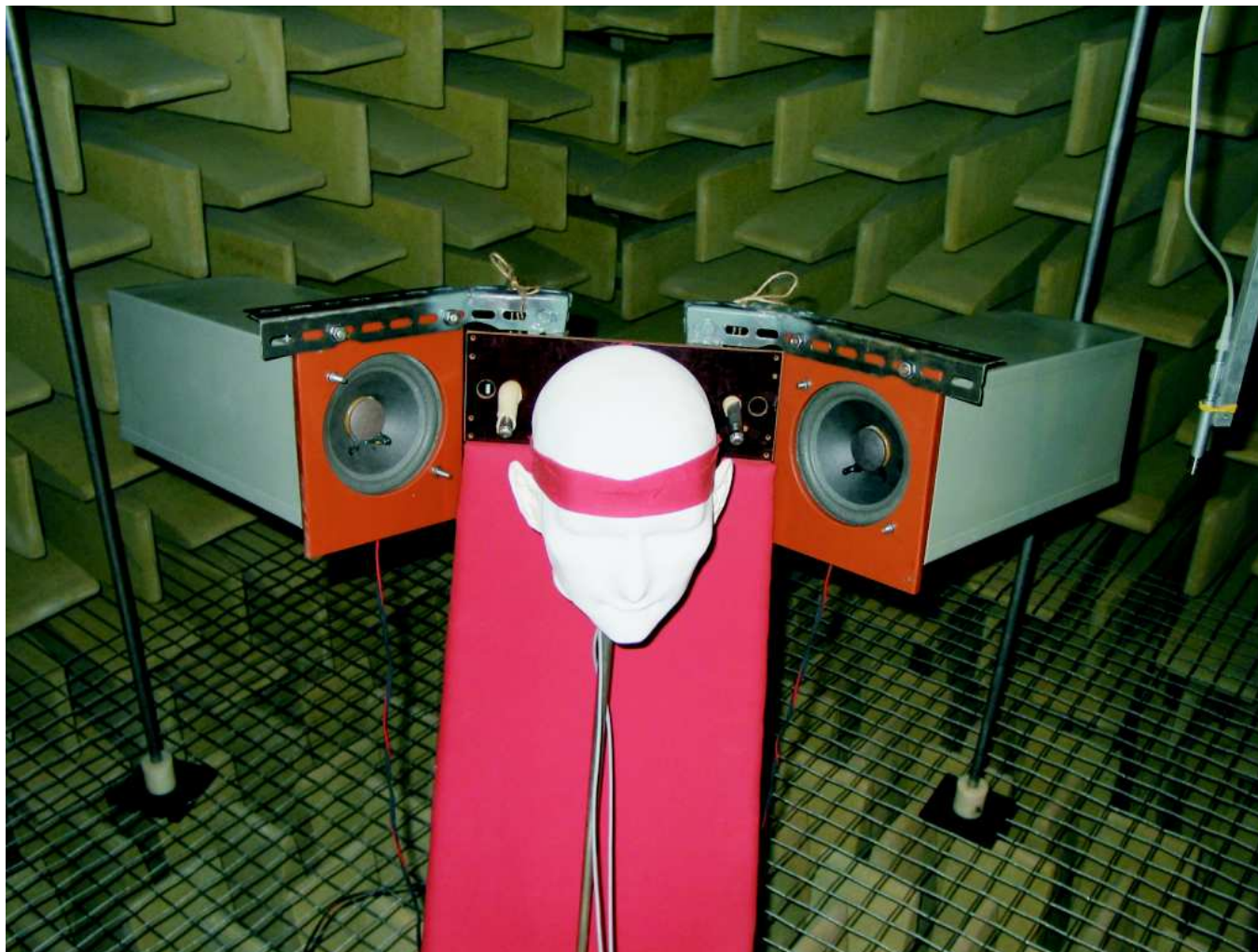


Aktivní řízení zvuku v 3D – Zóny ticha



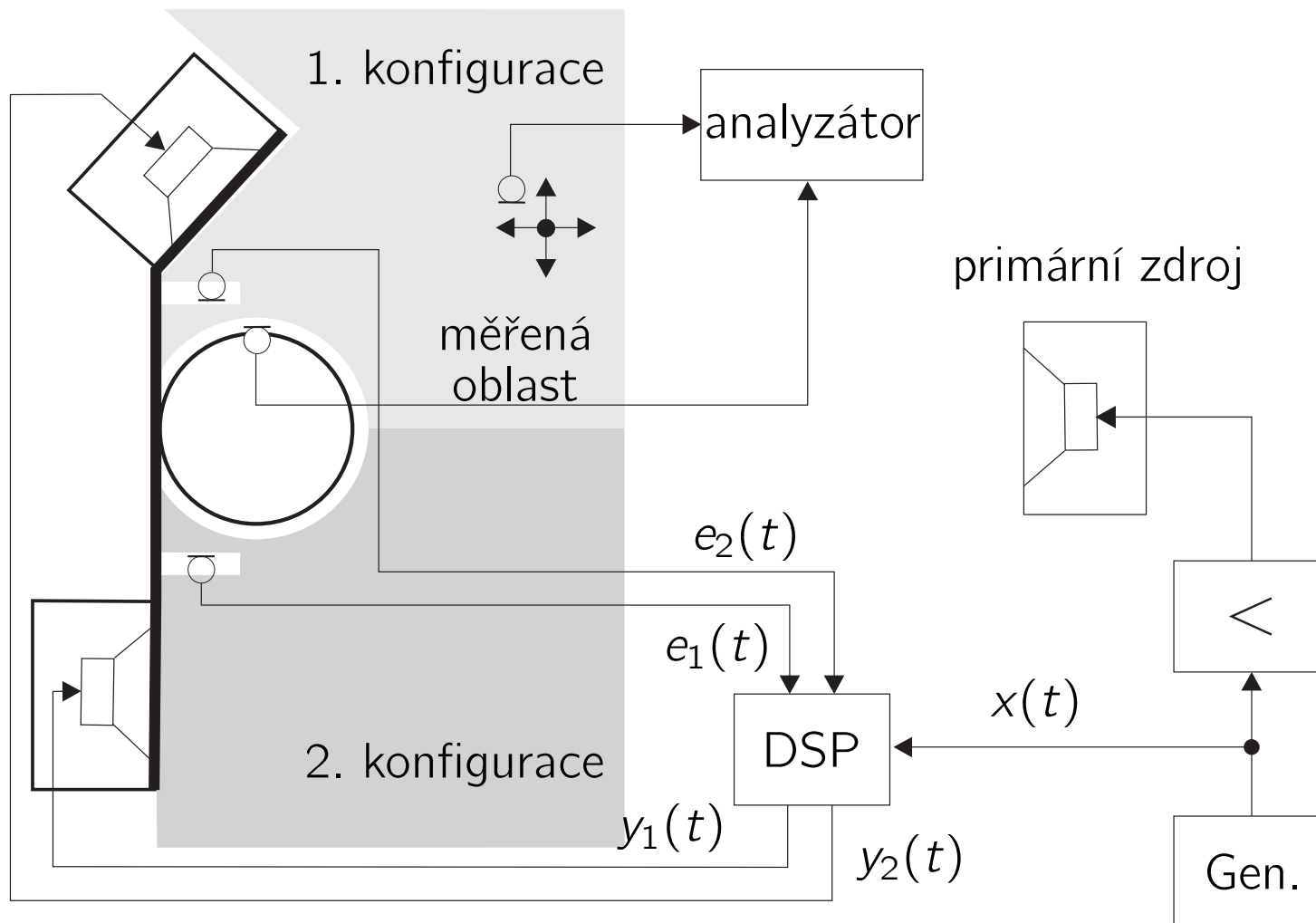


Aktivní řízení zvuku v 3D – Zóny ticha



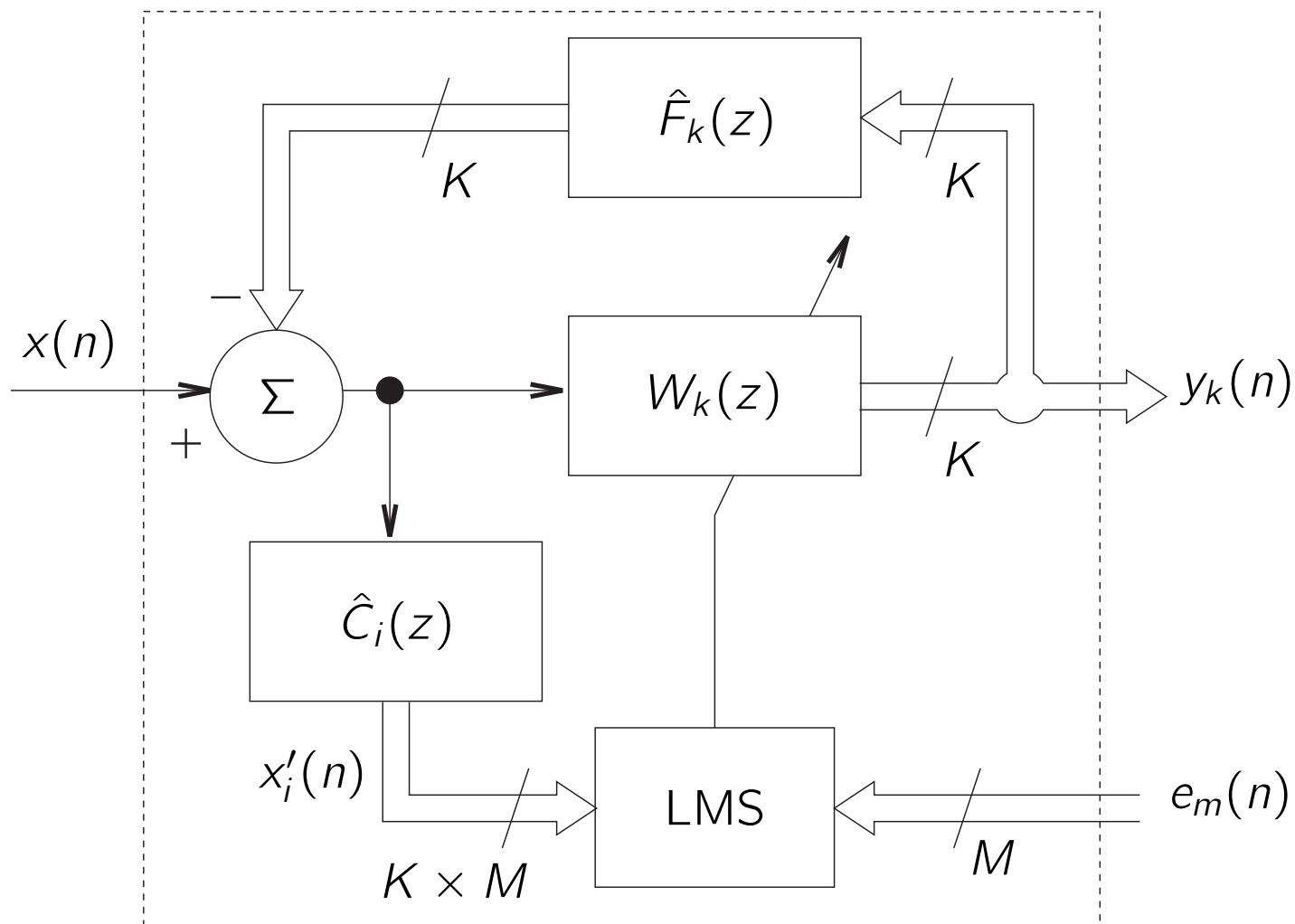


Aktivní řízení zvuku v 3D – Zóny ticha



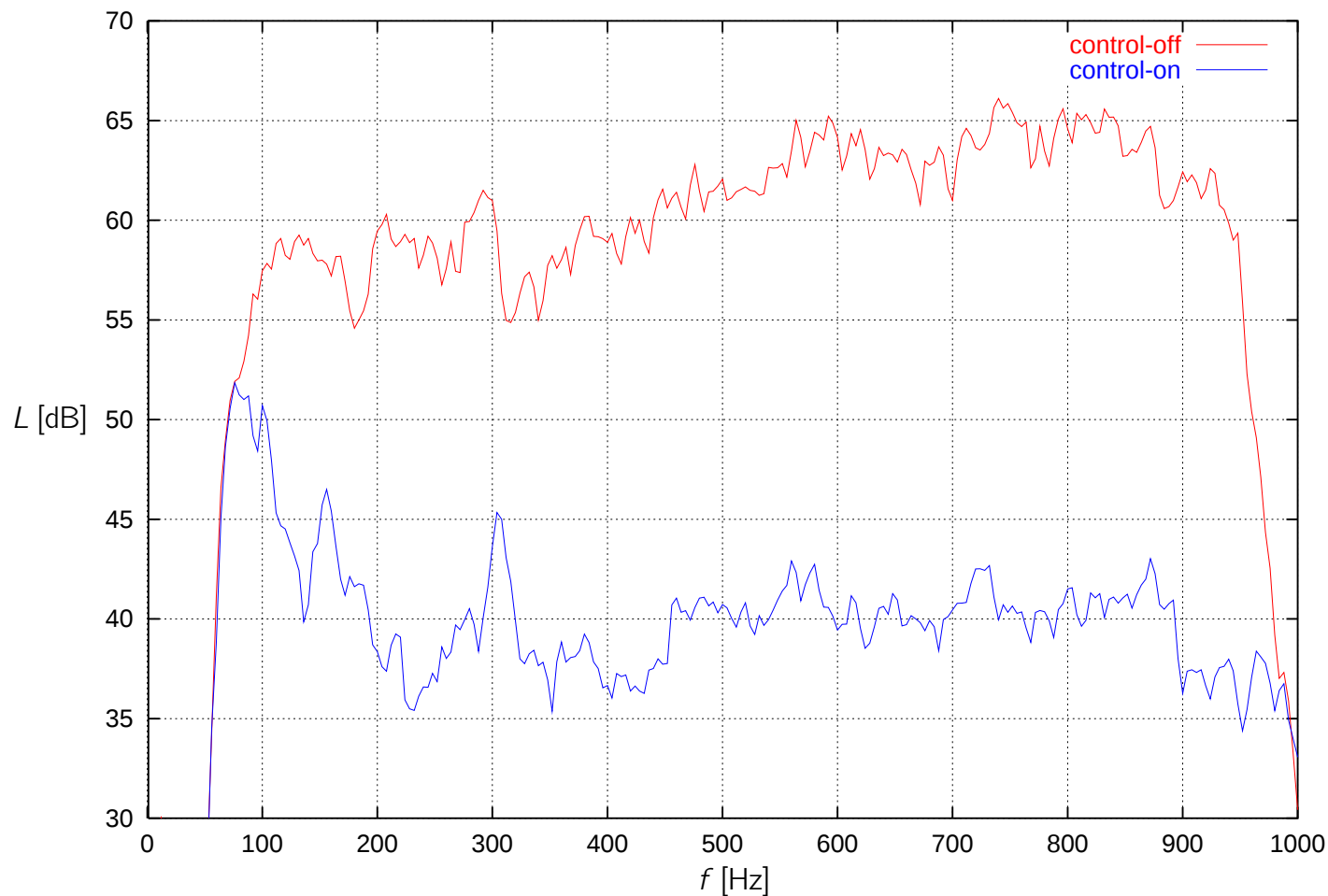


Aktivní řízení zvuku v 3D – Zóny ticha



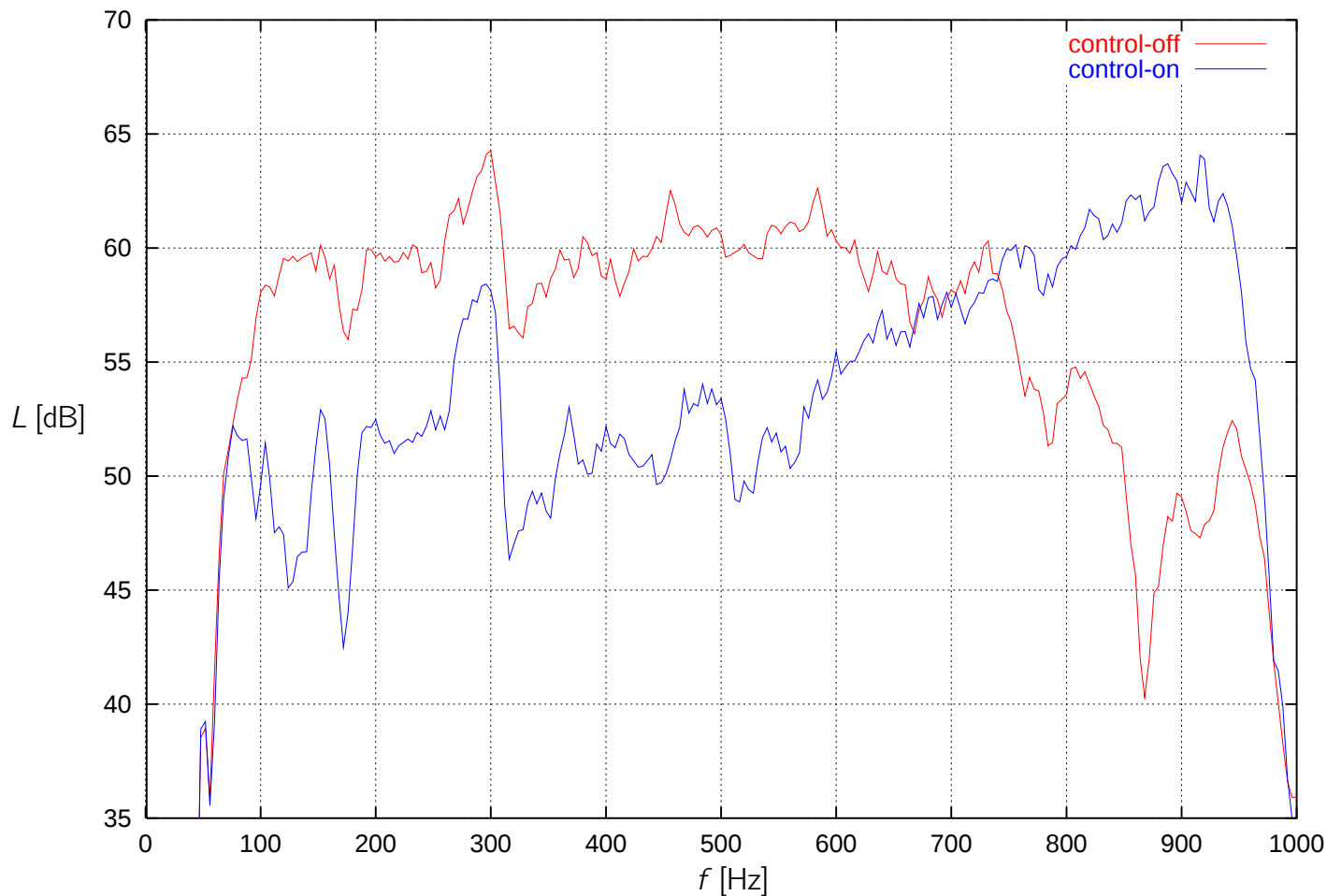


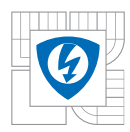
Aktivní řízení zvuku v 3D – Zóny ticha



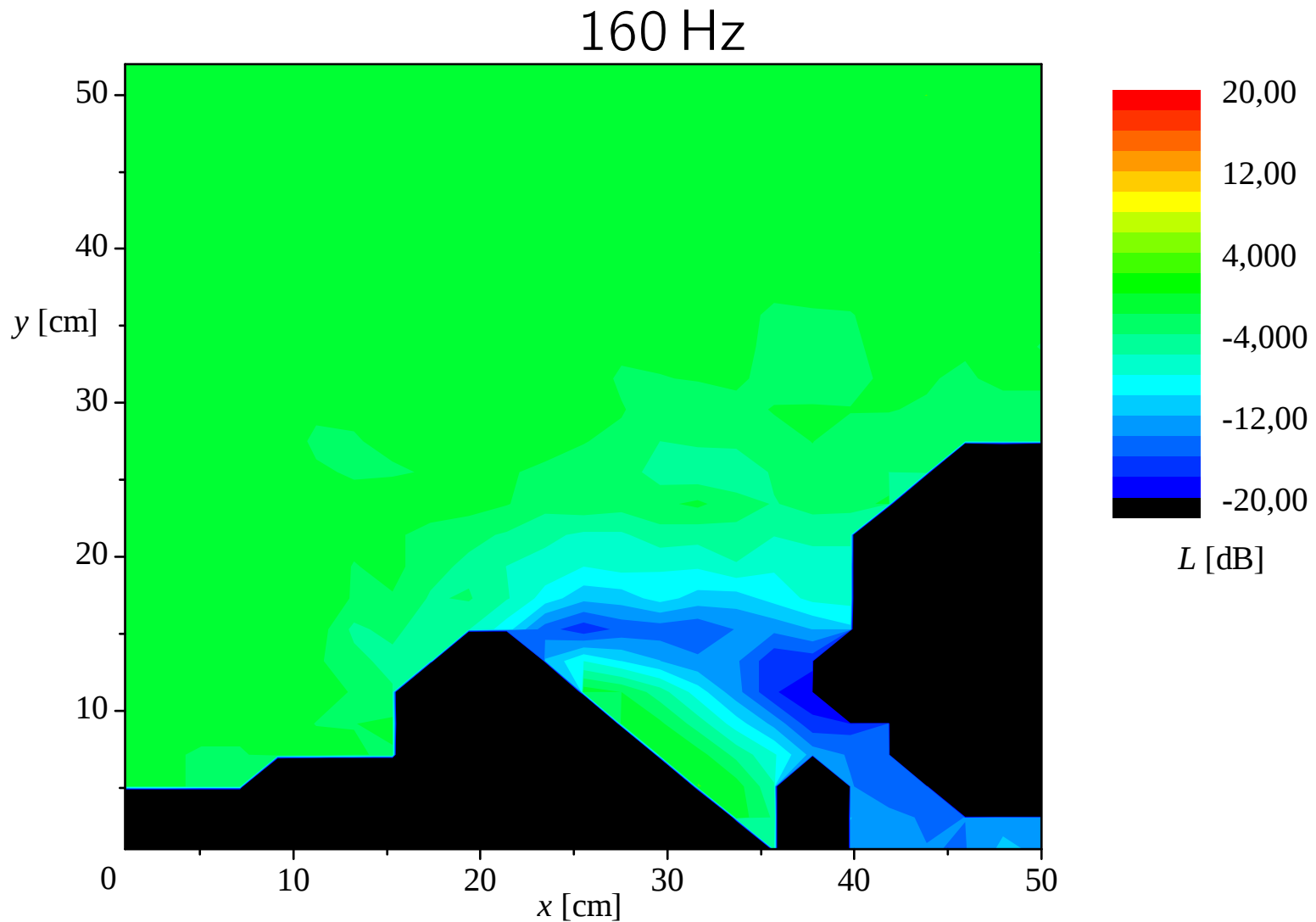


Aktivní řízení zvuku v 3D – Zóny ticha



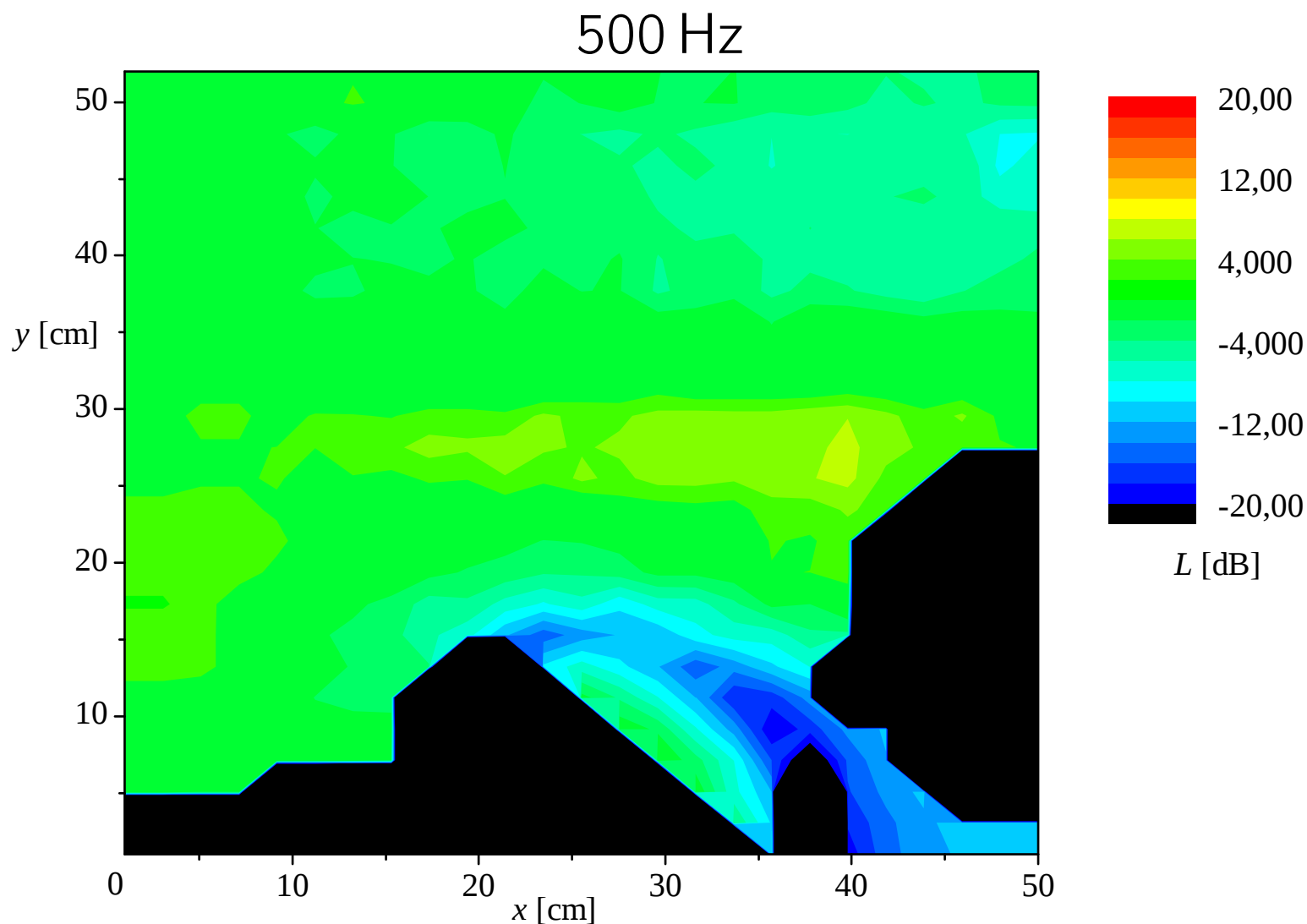


Aktivní řízení zvuku v 3D – Zóny ticha



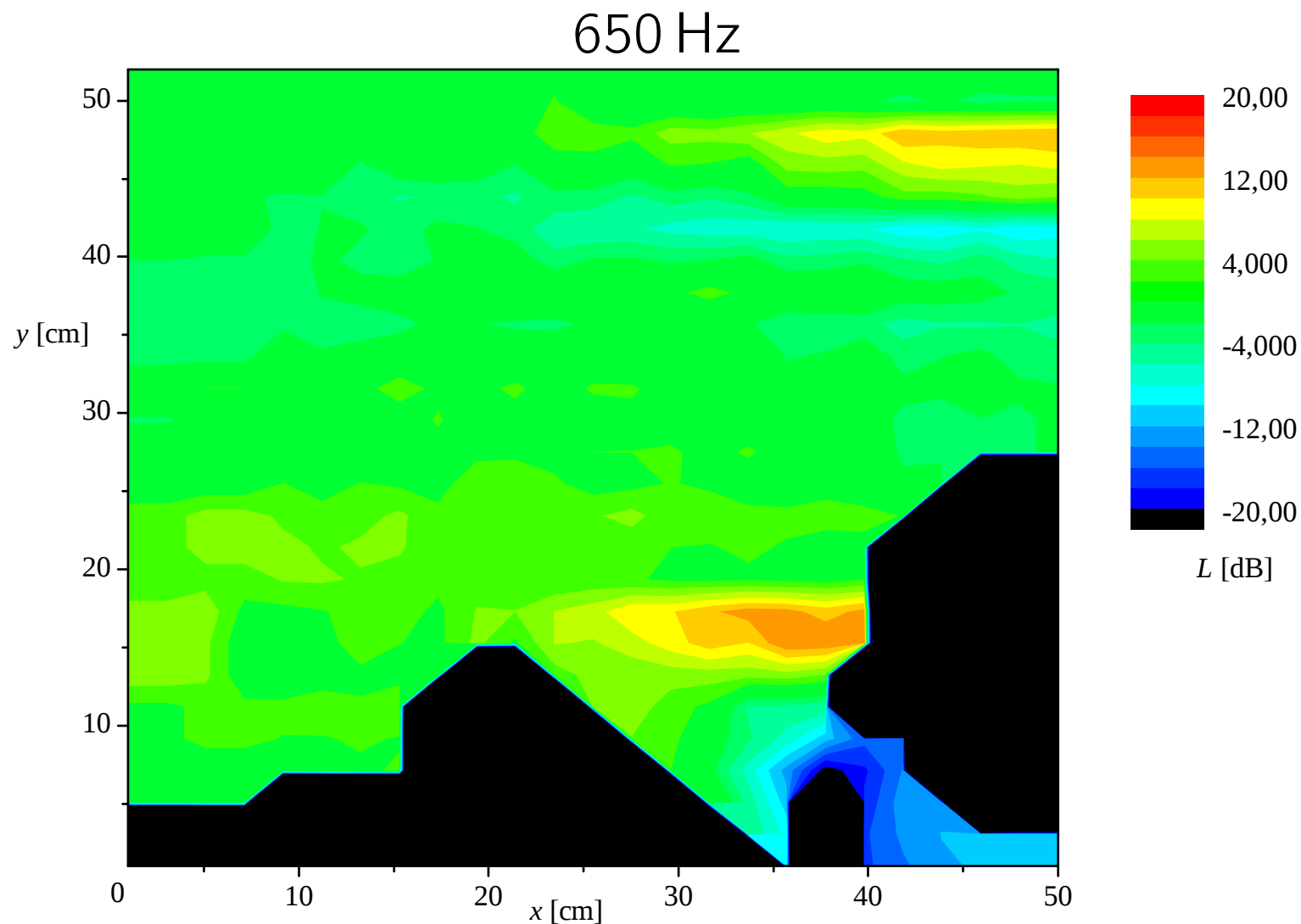


Aktivní řízení zvuku v 3D – Zóny ticha



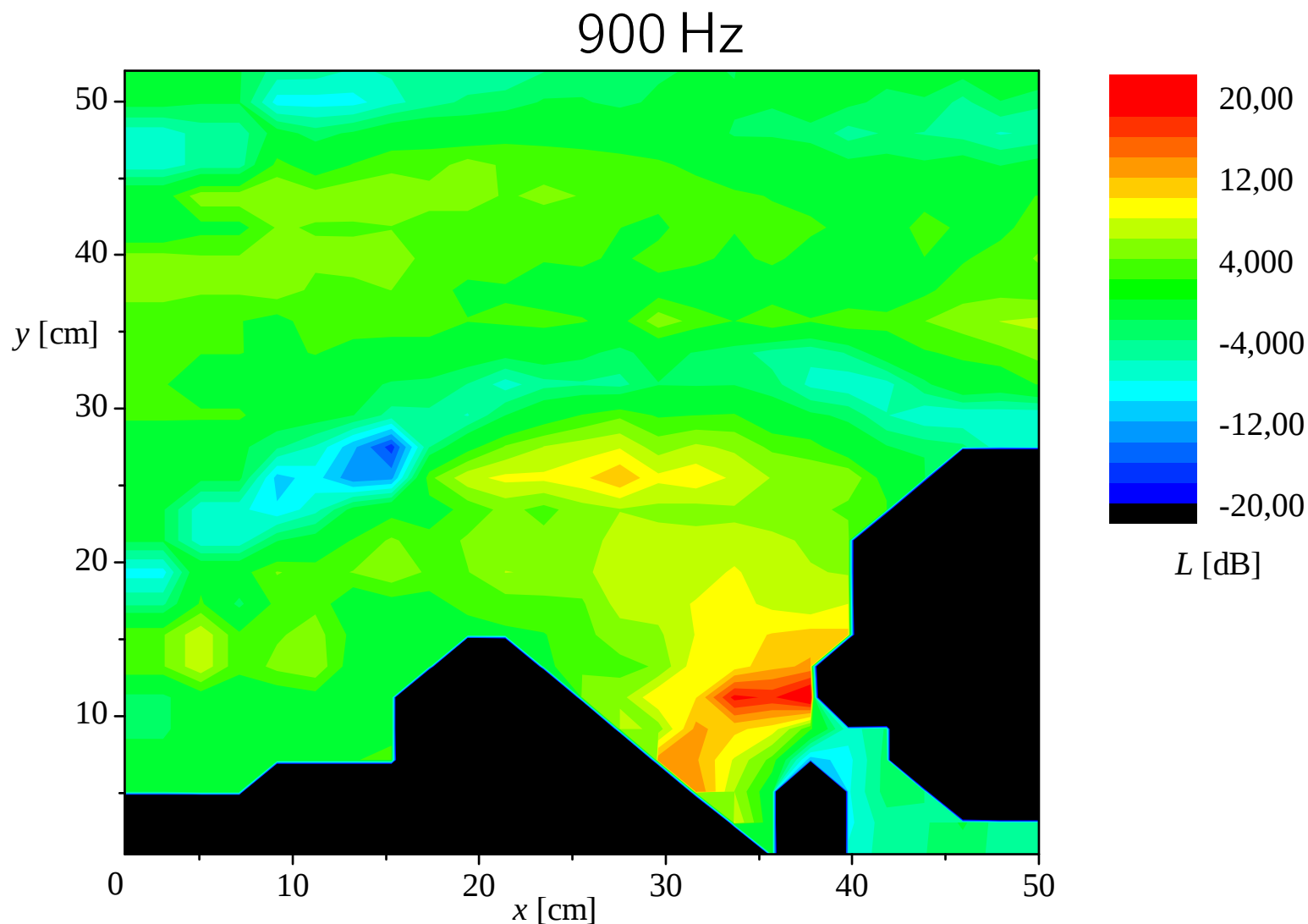


Aktivní řízení zvuku v 3D – Zóny ticha



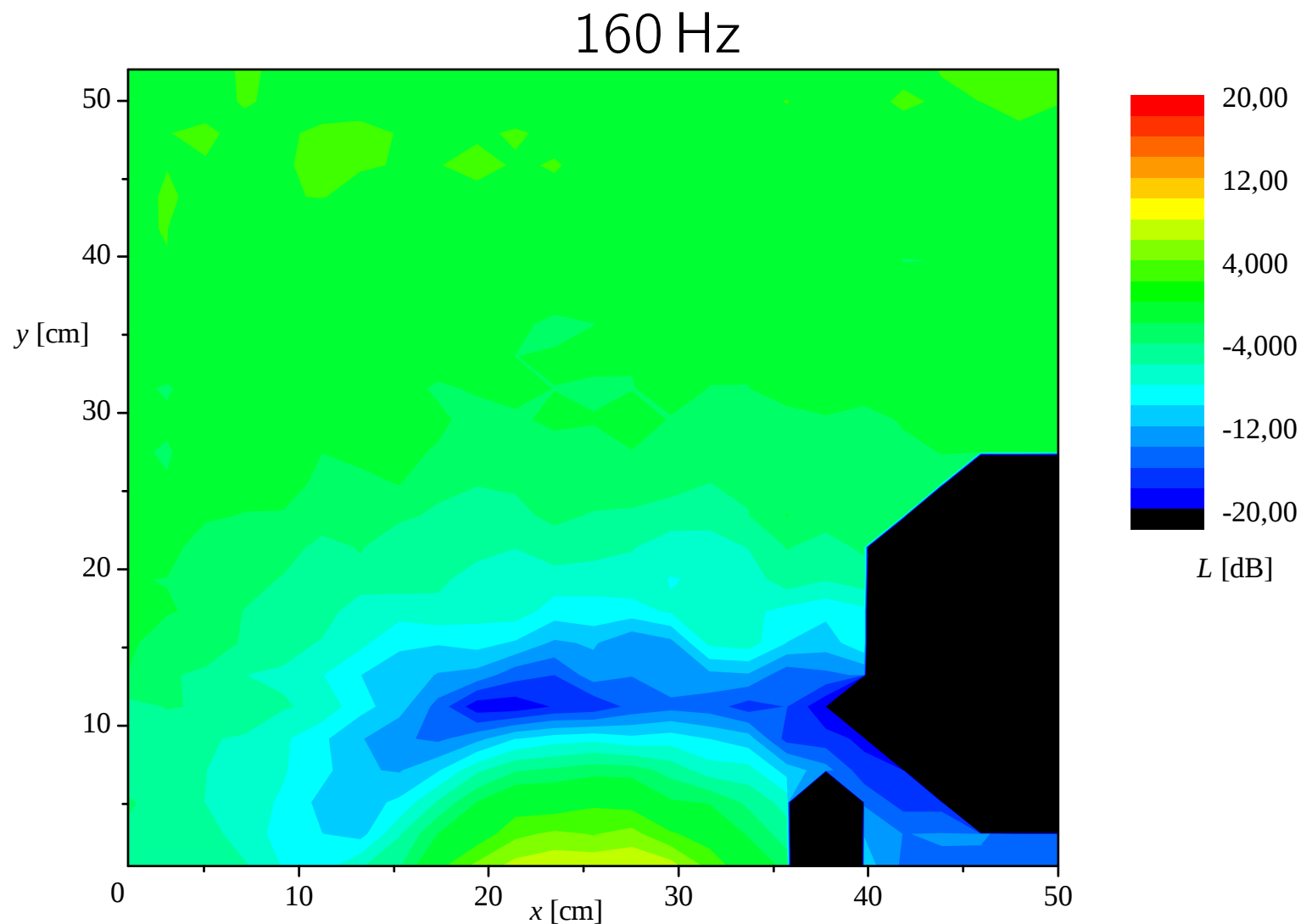


Aktivní řízení zvuku v 3D – Zóny ticha



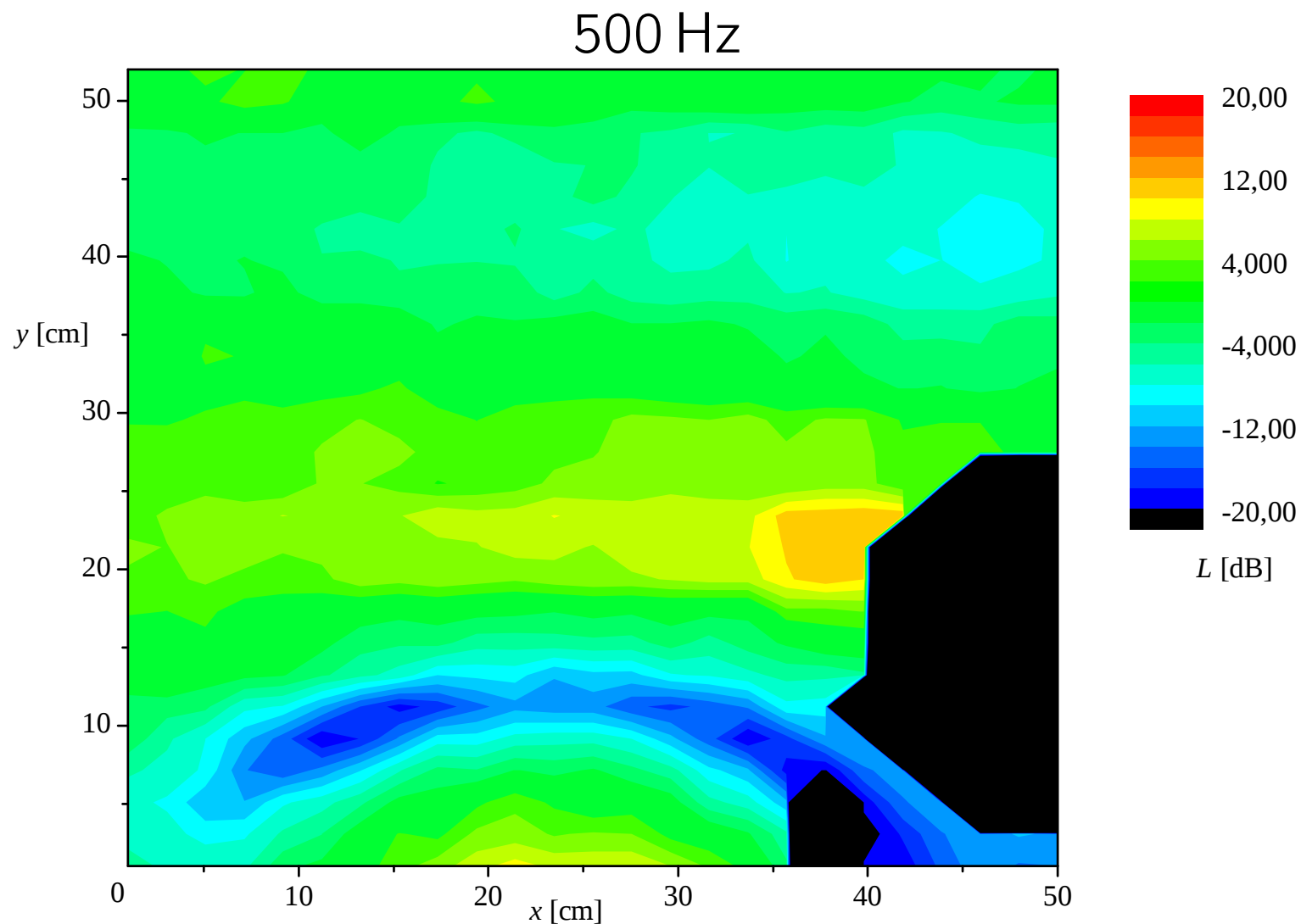


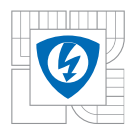
Aktivní řízení zvuku v 3D – Zóny ticha



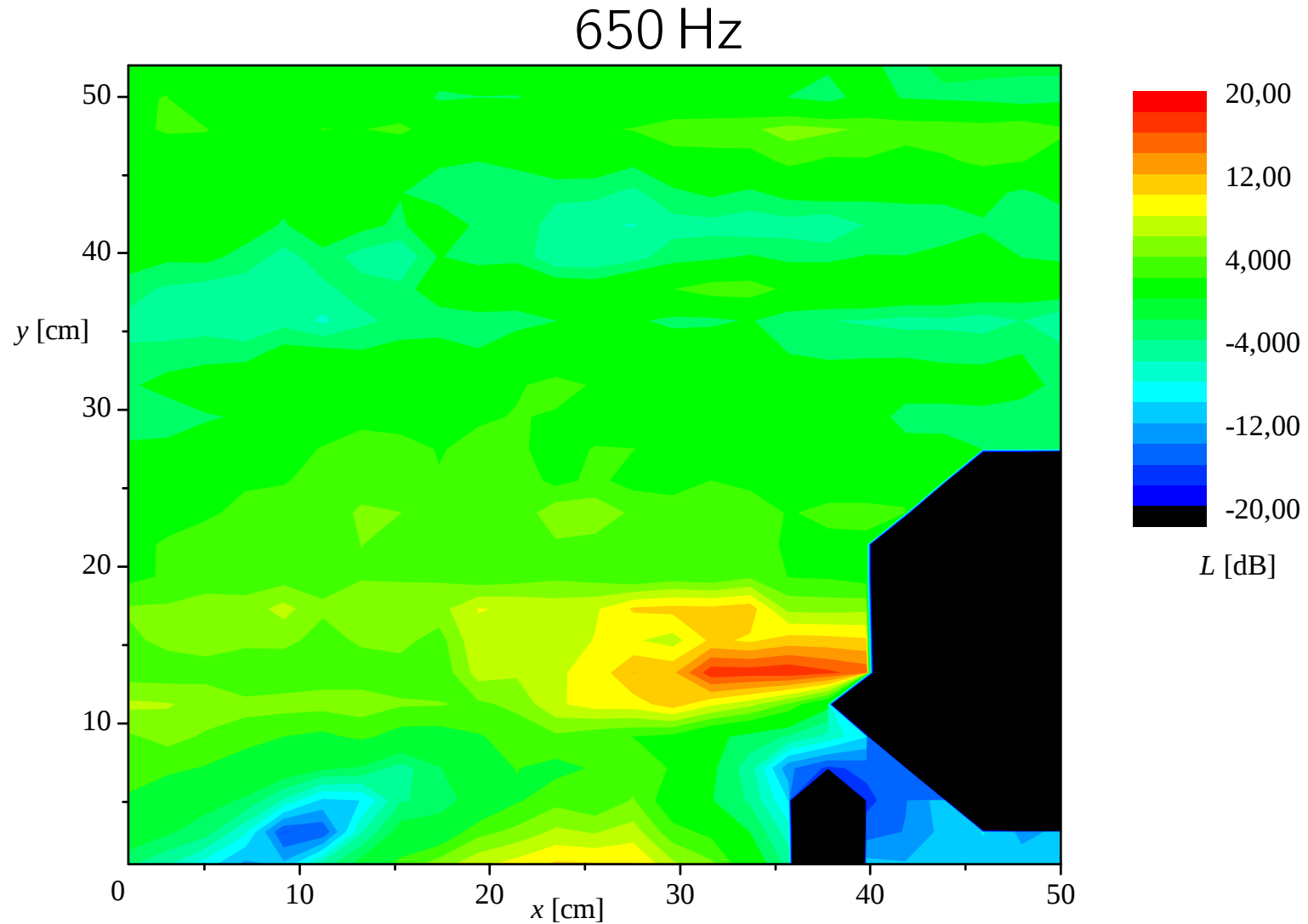


Aktivní řízení zvuku v 3D – Zóny ticha



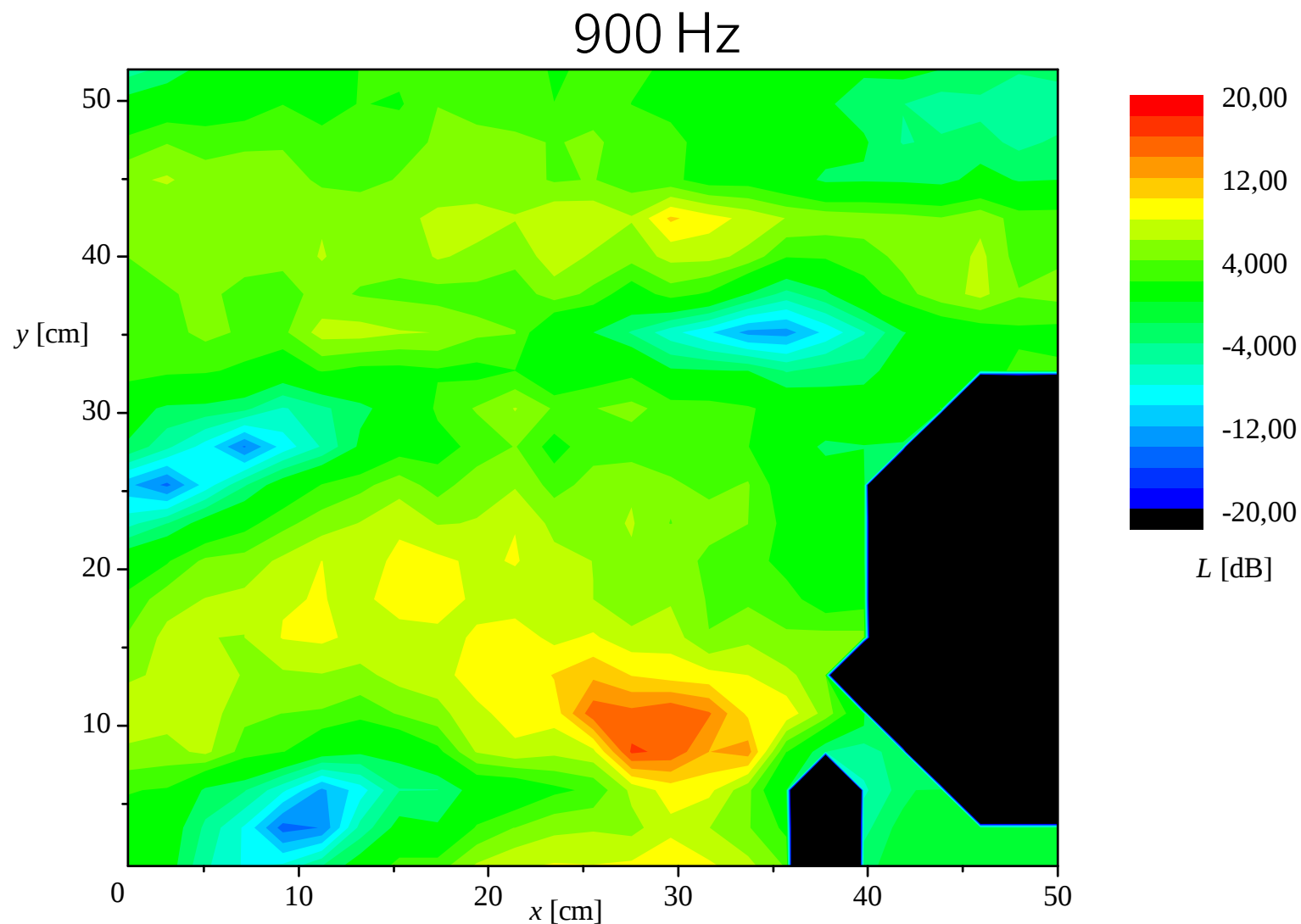


Aktivní řízení zvuku v 3D – Zóny ticha





Aktivní řízení zvuku v 3D – Zóny ticha





Příklady aplikací



Hlavní aplikace

- Potrubí - klimatizace, výfuky
- Vniřní hluk automobilů
- Vnitřní hluk letadel a vrtulníků
- Tlumení hluku ventilátorů
- Tlumení hluku transformátorů
- Aktivní protihlukové bariéry
- Aktivní úprava vnitřní akustiky
- Aktivní absorbéry
- Aktivní úprava doby dozvuku
- Aktivní chrániče sluchu
- Zóny ticha

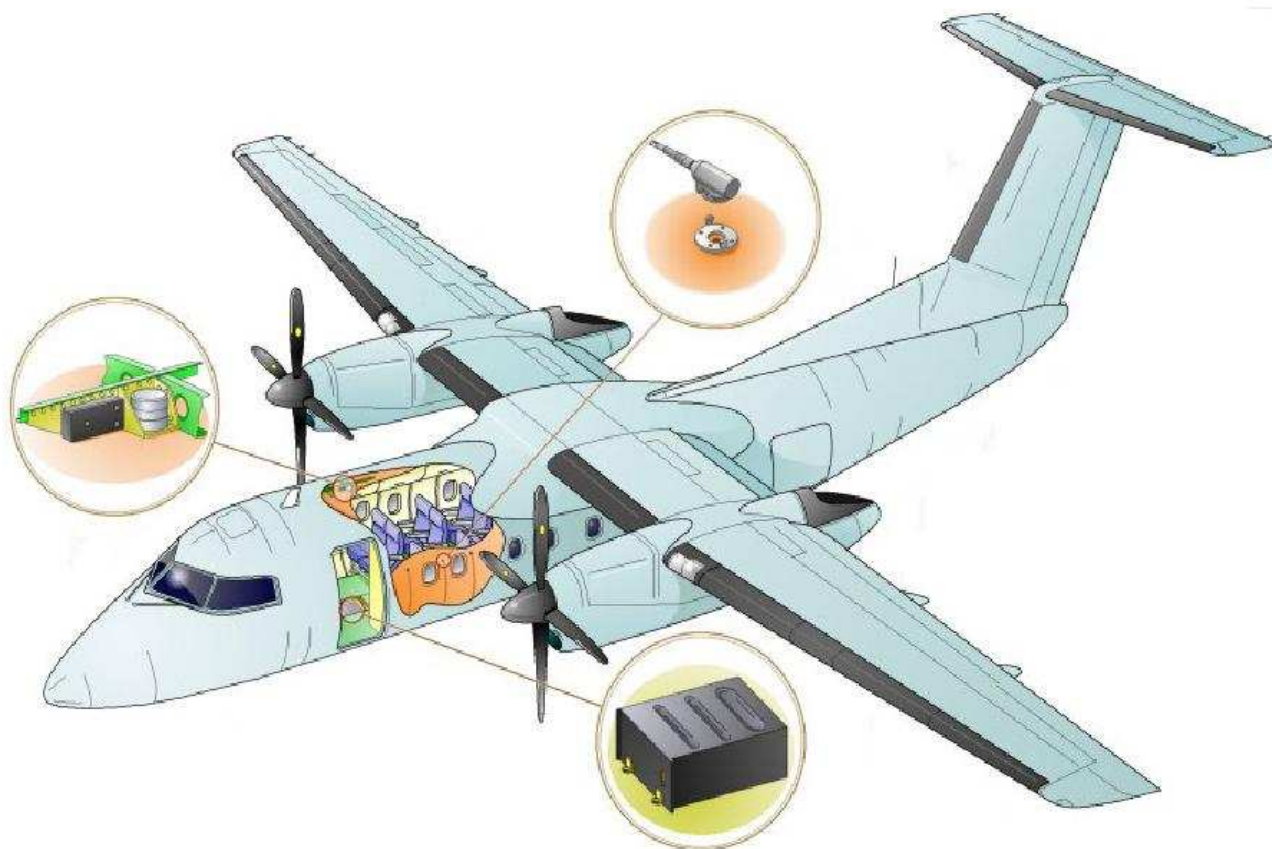


Hlavní aplikace

- Tlumení kmitání (budovy, lodě, nosné konstrukce ...)
- Aktivní izolace vibrací
- Semiaktivní tlumení vibrací, „chytré“ materiály
- Aktivní řízení strukturální akustiky (ASAC)
- ...



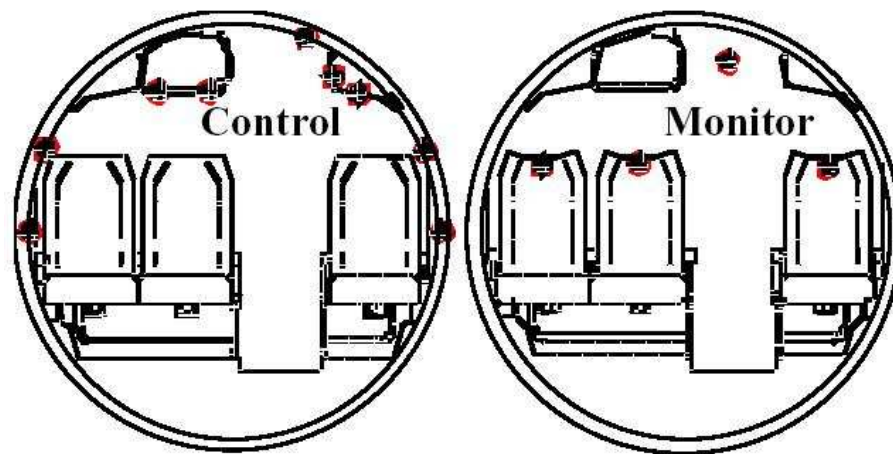
Vnitřní hluk letadel



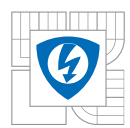
Převzato od S.J. Elliott, Active 2009



Vnitřní hluk letadel

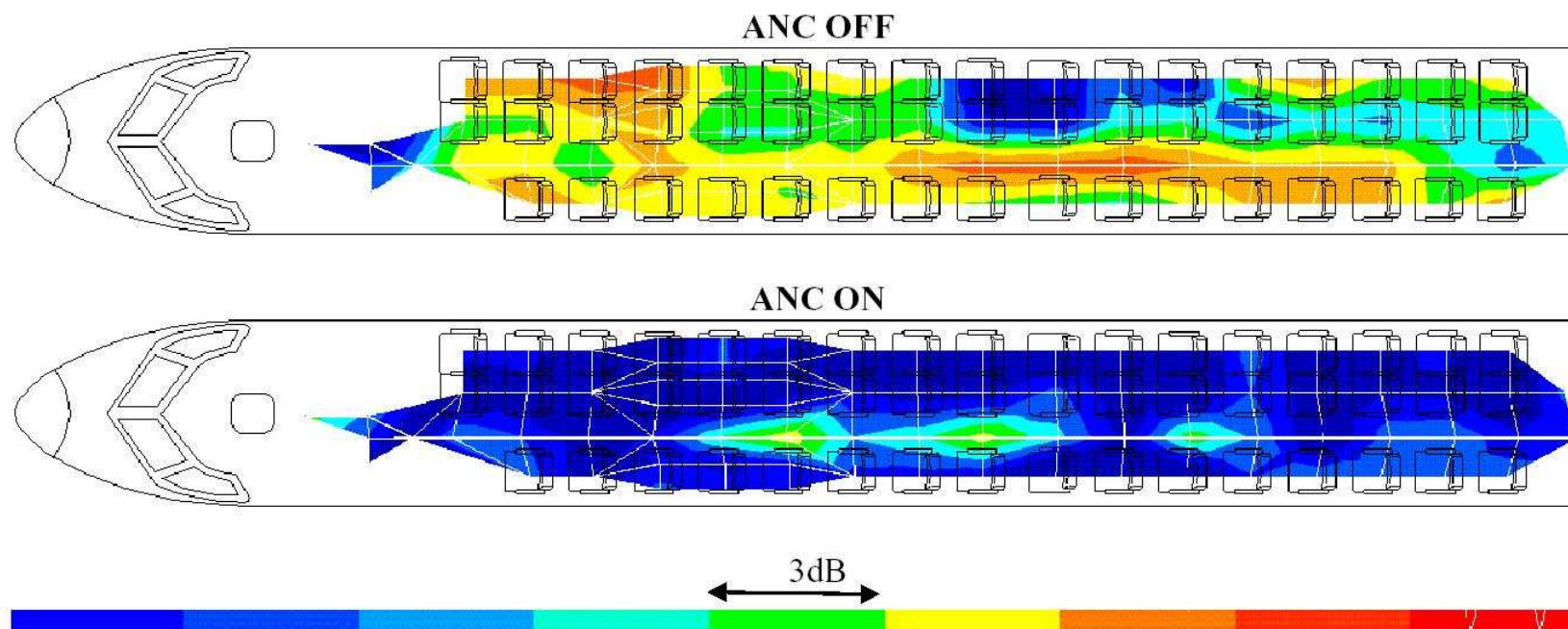


Převzato od S. Leth a W.G. Halvorsen, Inter-noise 99



Vnitřní hluk letadel

Monitor microphones

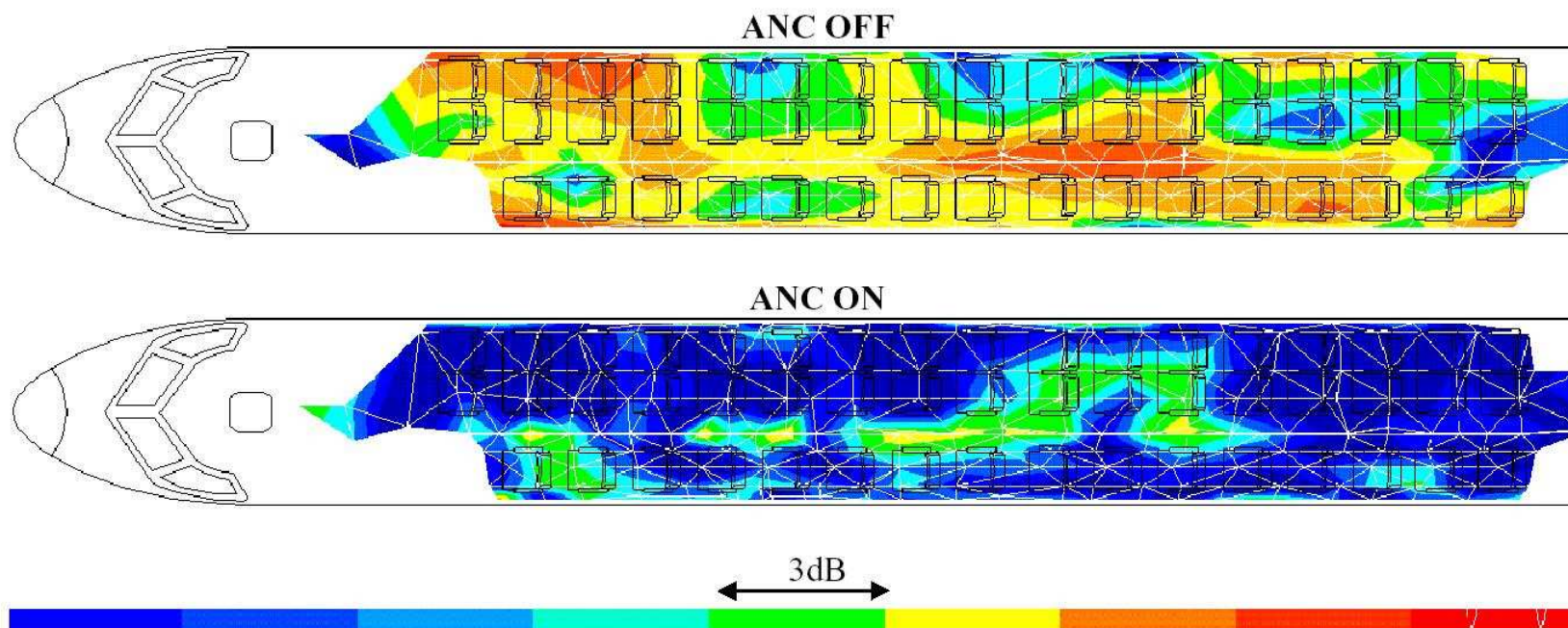


Převzato od S. Leth a W.G. Halvorsen, Inter-noise 99



Vnitřní hluk letadel

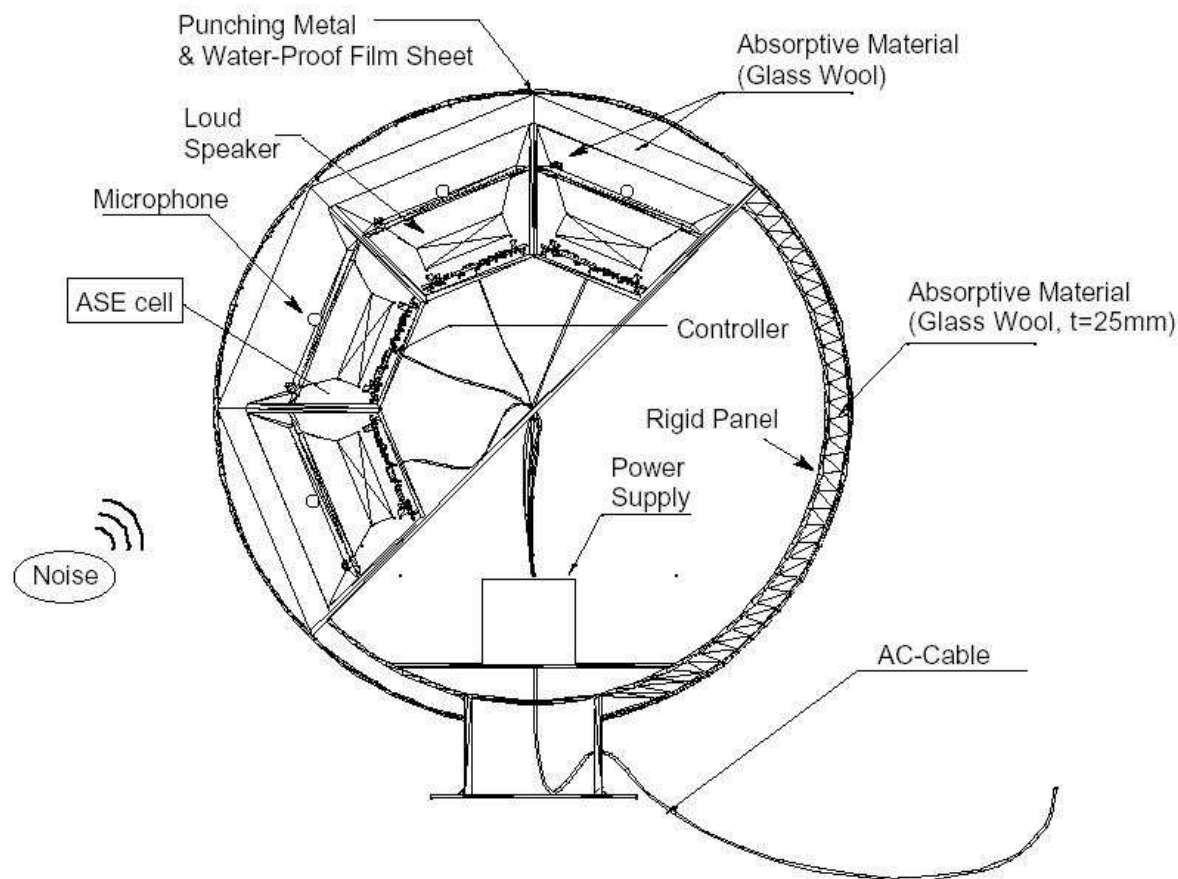
Control microphones



Převzato od S. Leth a W.G. Halvorsen, Inter-noise 99



Aktivní protihlukové bariéry



Převzato od Ohnishi et al., Active 1999



Závěr



Aktivní metody

- Výhody
 - ▶ Účinné na nízkých frekvencích
 - ▶ Malé rozměry
 - ▶ Hygienicky nezávadné



Aktivní metody

■ Výhody

- ▶ Účinné na nízkých frekvencích
- ▶ Malé rozměry
- ▶ Hygienicky nezávadné

■ Nevýhody

- ▶ Nutná údržba
- ▶ Cena za pořízení a provoz
- ▶ Nevhodné pro vysoké frekvence
- ▶ Jen pro některé typy zdrojů



Pasivní metody

■ Výhody

- ▶ Při vhodné konstrukci velmi trvanlivé
- ▶ Obvykle nevyžaduje údržbu
- ▶ Velký výběr materiálů a variant

■ Nevýhody

- ▶ Malá účinnost na nízkých frekvencích
- ▶ Prostorově náročné
- ▶ Účinnost je omezena fyzikálními vlastnostmi použitých materiálů
- ▶ Hygienické problémy



Hlavní směry vývoje

- Měníče pro aktivní řízení zvuku i vibrací
- Vývoj stabilnějších algoritmů
- Hledání nových aplikací
 - ▶ Protihlukové bariéry
 - ▶ Extrémní podmínky (letecké motory, nelineární akustika)
 - ▶ Aktivní snižování vibrací a kmitání
- Přejít ke komerčnímu využití
 - ▶ Aktivní a hybridní tlumiče hluku v potrubích
 - ▶ Aktivní úprava doby dozvuku
 - ▶ Aktivní chrániče sluchu
 - ▶ Aktivní tlumení náprav vozidel
- ...



Čas na dotazy...



Děkuji za pozornost