

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles

**RNDr. Karel Pellant, Csc.**

**PAPRSKOVÉ METODY V AKUSTICE  
RAY METHODS IN ACOUSTICS**

TEZE HABILITAČNÍ PRÁCE



BRNO 2001

## Klíčová slova

akustika, paprsková metoda, modelování, absorpce, přenosová funkce, cepstrální filtrace

## Key words

acoustic, ray method, modeling, absorption, sound transfer function, cepstral filtering

Originál práce je uložen na oddělení vědeckých a zahraničních styků FSI VUT v Brně

## Obsah

Představení autora .....	4
1 Úvod.....	5
2 Vlnové pole v paprskovém přiblížení .....	6
3 Šíření vln ve vrstevnatém prostředí .....	7
3.1 Výpočet neprůzvučnosti stěn .....	7
3.2 Výpočet stěnové absorpce.....	9
3.3 Přenosové vlastnosti zevního zvukovodu .....	10
4 Aplikace paprskových metod na modelech třírozměrných struktur .....	12
4.1 Modelování hluku v kabině vozidel.....	12
4.2 Modelování hluku ze silniční dopravy .....	14
4.3 Studium efektu šeptající galerie .....	14
5 Implementace absorpčních jevů do výpočetních procedur akustického modelování .....	17
5.1 Uvážení absorpce pomocí korekce vzorků impulsní stopy .....	18
6 Aplikace cepstrální filtrace při určování absorpce.....	19
5 Závěr .....	21
Literatura.....	23
Summary .....	24

## Představení autora

RNDr. Karel Pellant, Csc. se narodil 14. 3. 1946 v Čáslavi. V roce 1969 ukončil vysokoškolské studium na Přírodovědecké fakultě Univerzity Jana Evangelisty Purkyně v Brně v oboru fyzika



pevné fáze. Po absolvování přírodovědecké fakulty nastoupil jako asistent na katedru fyziky FE VUT v Brně. V roce 1970 na základě konkursu přešel do Ústavu užité geofyziky (ÚUG) na místo výzkumného pracovníka v oddělení fyziky hornin. Zde se zabýval Mössbauerovým jevem, ultrazvukovými metodami a matematickým modelováním seismických vlnových polí. Ve školním roce 1988-1989 přednášel geofyzikální metody na Univerzitě Anaba, Alžírsko. V roce

1991 přešel na základě konkursu na katedru mechaniky těles FSI VUT Brno na místo odborného asistenta, kde vyučuje v základním kurzu statiku, kinematiku a dynamiku. Jeho odborná činnost na FSI VUT je zaměřena hlavně na hlukovou problematiku.

Během svého pobytu v ÚUG byl řešitelem řady celostátních a mezinárodních výzkumných projektů zaměřených na studium fyzikálních vlastností hornin a vývoj počítačového softwaru pro zpracování seismických dat. Do mezinárodních výzkumů se zapojil i na FSI - např. projekt Copernicus “Mathematical modelling and computer simulation of the ultrasound propagation through structural materials and applications“. V současné době se podílí na řešení 2 celostátních grantových projektů a výzkumného záměru FSI. Dosažené vědecké poznatky publikoval v 56 původních článcích v časopisech, sbornících sympózií a konferencí (z toho 26 v zahraničí).

# 1 Úvod

Hlavním cílem práce je pojednat o současném stavu teorie paprskových metod se zaměřením na jejich aplikace v akustice. Jedním z podnětů k sepsání této práce byla snaha poukázat na to, že akustickým aplikacím paprskových metod je zatím neprávem věnována ve srovnání s jinými obory studujícími elastická vlnová pole (např. seismologií) poměrně malá pozornost.

Paprskové metody jsou sice přibližné, jejich používání má řadu omezení a výsledky mohou být zatíženy jistou chybou. Nemohou proto soutěžit v přesnosti s metodami založenými na přesném numerickém řešení pohybových rovnic elastického kontinua v těch situacích, kde jsou obojí přístupy aplikovatelné. Tím se u mnoha akustiků vytvořil názor, že paprskové metody už v současné době přežívají a že s rozvojem počítačové techniky přichází období jen přesných numerických metod.

Cílem práce je proto na konkrétních příkladech ukázat, že při modelování akustických vlnových polí jsou paprskové metody v mnoha případech nezastupitelné - studium šíření zvuku na velké vzdálenosti, identifikace interferujících vln, popis šíření akustických vln ve viskoelastických, tenkovrstevnatých prostředích apod. Současně je také ukázáno, že současné modifikace paprskové teorie umožňují řešit řadu úloh i nad rámec „klasické“ paprskové akustiky a je možné pomocí nich popsat šíření i nepaprskových vln jako jsou např. vlny nehomogenní, difragované, ekranované apod. V neposlední řadě cílem této práce je také pokusit se zaplnit mezeru v literatuře zabývající se touto problematikou. V souvislosti s tím je v této práci řešena řada dílčích problémů a jejím obsahem je tedy:

- a) odvození vztahů pro přenosovou funkci akustického tlaku a akustické výchylky pro vrstevnatá, absorbující prostředí,
- b) výpočet vlnových polí akustického tlaku a akustické výchylky pro polohu vysílače a přijímače uvnitř vrstevnatého prostředí,
- c) určování neprůzvučnosti a koeficientu odrazivosti stěn,
- d) určení souvislosti mezi geometrií zvukovodu a jeho přenosovými vlastnostmi,
- e) mapování hluku v kabinách vozidel,
- f) predikce šíření silničního hluku v případě laterálního zářezu v reliéfu terénu,
- e) objasnění efektu šeptající galerie,
- f) implementace frekvenčně závislých absorpčních jevů do procedur matematického modelování akustických vlnových polí,
- g) řešení obrácené úlohy na absorpci pomocí cepstrální filtrace.

## 2 Vlnové pole v paprskovém přiblížení

Základní principy paprskových metod byly formulovány již v roce 1911 Sommerfeldem a Rungem [1]. Uvažujme harmonickou vlnu

$$\mathbf{u}_H(x_i, t, \omega) = \mathbf{A}(x_i, \omega) e^{i\omega t} e^{-i\omega x}, \quad (1)$$

kde u vektoru amplitudy  $\mathbf{A}$  předpokládáme pro velké  $\omega$  pomalou změnu se souřadnicemi  $x_i$ . To znamená, že v prostředí vylučujeme přítomnost výrazných akustických nehomogenit srovnatelných nebo dokonce menších než je vlnová délka  $\lambda$  šířících se vln (např. poloměr křivosti rozhraní  $r \ll \lambda$ ). Jestliže pro hodnotu  $\mathbf{A}$  předpokládáme ohraničenost i při  $\omega \rightarrow \infty$ , pak můžeme provést asymptotický rozklad  $\mathbf{A}$  v mocninách  $\omega^{-1}$

$$\mathbf{A}(x_i, \omega) \cong \mathbf{U}^0(x_i) + (-i\omega)^{-1} \mathbf{U}^1(x_i) + (-i\omega)^{-2} \mathbf{U}^2(x_i) + \dots, \quad (2)$$

Dosažením paprskové řady do pohybové rovnice pro elastické prostředí

$$(\lambda + \mu) \text{grad div } \mathbf{u} + \mu \Delta \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \quad (3)$$

je možné dostat systém lineárních rovnic umožňujících zjistit amplitudové koeficienty  $\mathbf{U}^k$ .

Uvážíme-li v rozvoji (2) pouze první člen  $\mathbf{U}^0$ , pak z podmínky pro řešitelnost koeficientu  $\mathbf{U}^0$  dostaneme rovnice eikonálu pro základní typy elastických vln, tj. rovnice pro podélné a příčné vlny. Na tomto nultém přiblížení paprskové teorie (tzv. geometrické akustice) jsou založeny i současné komerční systémy používané v akustice. Např. v seismologii se však běžně používají i vyšší přiblížení, které umožňují popsat vznik a dynamiku vln šířících se striktně podél akustických rozhraní [2]. Aplikace těchto postupů by však mohly být v mnoha případech zajímavé i v akustice např. pro výklad a popis koincidenčních jevů.

Dalším v současné akustice často zanedbávaným problémem jsou frekvenčně závislé absorpční jevy. V každém reálném prostředí dochází k absorpci šířících se elastických vln, v mnoha případech je tento jev cílený (protihluková obložení, antivibrační nátěry apod.). Přitom opět komerční systémy používané v akustice absorpci buď zcela zanedbávají nebo ji uvažují poměrně zjednodušeně. U většiny látek je součinitel elastických vln frekvenčně závislý a je doprovázen závislostí rychlosti na frekvenci (tzv. materiálovou dispersí), která může značně ovlivnit tvar šířících se signálů [3]. Výhodou paprskových metod je v tom, že známe časy příchodu jednotlivých vln. Pro daný vstupní signál lze pak uvážení obou zmiňovaných jevů provést na

základě konvoluce odezvy ideálně elastického prostředí s disipačním operátorem [4]. Využitím replikační vlastnosti vzorkovací funkce je v práci tento přístup zobecněn i na případy, kdy nejsou známy časy příchodů jednotlivých vln [5]. Tímto způsobem pak lze absorpci implementovat i pro metody založené na numerickém řešení pohybových rovnic jako je např. metoda konečných prvků.

### 3 Šíření vln ve vrstevnatém prostředí

V akustice se často setkáváme s konstrukcemi, u kterých se hodnoty akustických parametrů mění pouze podél jednoho směru. V tomto případě je výhodné použití kombinace maticového formalismu (vycházíme přitom ze sloupcové matice obsahující jako prvky akustickou výchylku a akustický tlak) a analytického výpočtu násobně odražených vln v jednotlivých vrstvách. Tento způsob v případě vrstevnatých prostředí umožňuje odstranit jednu z hlavních nevýhod paprskových metod tj. zahrnutí všech násobně odražených vln. Další výhodou tohoto postupu je to, že výsledné vztahy jsou přímo ve frekvenční oblasti a frekvenčně závislá absorpce může být snadno zohledněna pomocí komplexních rychlostí .

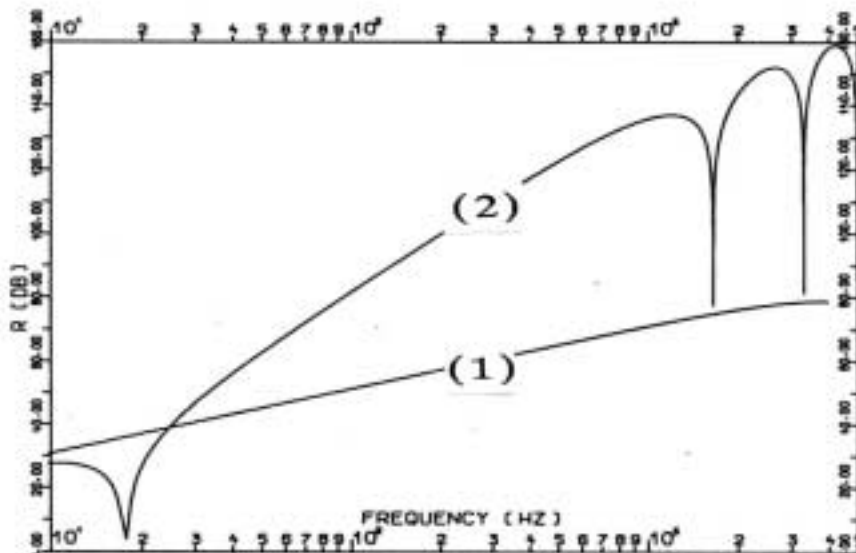
#### 3.1 Výpočet neprůzvučnosti stěn

Pro rovinou vlnu šířící se podél osy  $z$  s uvážením Hookova zákona platí mezi skalárním vlnovým potenciálem  $\varphi$  a tlakem  $p$  vztah

$$c^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = \frac{-p}{\rho}, \quad (4)$$

kde  $c$  je rychlost šíření elastických vln,  $\rho$  je hustota a  $p$  je tlak. Uvažujeme-li řešení rovnice (4) na bázi harmonických funkcí a pro vrstevnaté prostředí aplikujeme standardní podmínky na rozhraní (spojitost akustické výchylky a akustického tlaku), pak můžeme postupným přepočtem přes všechna rozhraní dospět ke vztahu pro hodnotu tlaku pod souvrstvím při jednotkové hodnotě budícího tlaku nad souvrstvím tj. zjistit přenosovou charakteristiku souvrství pro tlak  $S_p^T(f)$

$$S_p^T(f) = \frac{\rho_S R_{12}(f)}{\rho_R}, \quad (5)$$



Obr. 1 Závislost stupně neprůzvučnosti na frekvenci pro jednoduchou (1) a zdvojenou cihlovou stěnu (2)

kde  $\rho_S$  a  $\rho_R$  jsou hodnoty hustot v horním a spodním poloprostoru,  $R_{12}(f)$  je koeficient lomu přechodové vrstvy [6]. Z hlediska stavební akustiky je aplikace tohoto vztahu zřejmě vhodná pro případy, kdy se zajímáme o zvukoizolační vlastnosti násobných stěn a příček, protože umožňuje nahradit používání nomogramů popř. nepřesných empirických vztahů. Příklad aplikace maticové metody ve stavební akustice je na obr. 1, kde jsou vypočítány neprůzvučnosti jednoduché a zdvojené stavební příčky.

Z hlediska aplikací ve strojírenství nás však zajímá případ, kdy zdroj hluku je obklopen zvukoizolačními vrstvami a hledáme přenosovou funkci akustického tlaku pro obecnou polohu vysílače a přijímače uvnitř vrstevnatého prostředí. V tomto případě je nutné zohlednit kromě vlny přímé i vlny odražené od souvrství nad vysílačem a pod přijímačem. Odvození příslušných vztahů pro přenosovou funkci pro dva typy zdrojů je rozebráno v práci [7].

V případě, že se zajímáme o závislost průběhu tlaku na čase  $p(t)$  při impulsním buzení (např. echogramy charakterizující auralizaci zvuků, interferenční jevy apod.), lze ji zjistit pomocí Fourierovy transformace

$$p(t) = 2 \operatorname{Re} \int_0^{\infty} P_0(f) S_p^T(f) e^{-2\pi i f t} dt, \quad (6)$$

kde  $P_0(f)$  je spektrum zdrojové funkce.

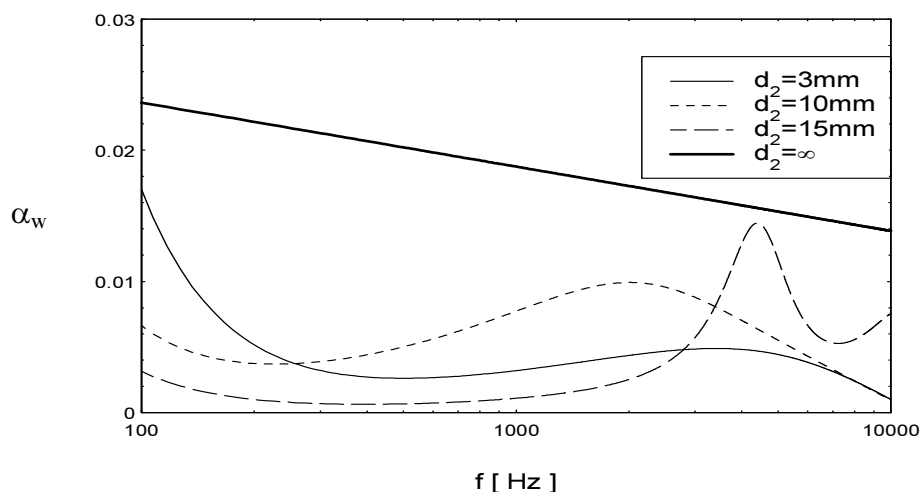


### 3.2 Výpočet stěnové absorpce

Při modelování šíření zvuku je důležité znát součinitel absorpce stěny  $\alpha_w(f)$ , který je definován jako poměr akustické intenzity  $I_2$  pohlcené určitou plochou k energii  $I_0$  na tuto plochu dopadající. Při totálním pohlcování je  $\alpha_w=1$  a při nulovém pohlcování  $\alpha_w=0$ . Hodnotu  $\alpha_w(f)$  můžeme určit za pomoci maticového formalismu zmiňovaného v předchozí kapitole, jestliže vysílač i přijímač umístíme do vzduchovém poloprostoru před souvrstvím. Pro součinitel absorpce stěny skládající se z více vrstev pak platí vztah

$$\alpha_w(f) = 1 - R_{11}^2(f), \quad (7)$$

kde  $R_{11}(f)$  je reflexní charakteristika souvrství pod odraznou plochou. Hodnota  $\alpha_w(f)$  tedy závisí jak na vnitřní absorpci odrážející stěny, její mocnosti a jejím vlnovém odporu  $\rho v(f)$  ale také na odrazných vlastnostech dalších podložních vrstev. Příklad závislosti  $\alpha_w(f)$  pro vrstvu měkké lidské tkáně podložené vrstvou kostní tkáně je na obr. 2. Jak je zřejmé z tohoto obrázku popř. jak ukázaly testovací výpočty [8], při malé mocnosti 1. odrazné vrstvy  $d_2$  se uplatňuje vliv dalších podložních vrstev i při poměrně vysoké absorpci uvnitř 1. odrážející vrstvy. V případě vrstevnatých stěn nelze tedy považovat  $\alpha_w(f)$  za čistě materiálový parametr 1. odrazné vrstvy jak je někdy v literatuře uváděno. V oblasti frekvencí odpovídající rezonanční frekvenci některé z podložních vrstev je amplituda odrazu poměrně značně citlivá na hodnotu vnitřní absorpce této vrstvy. Tento jev však

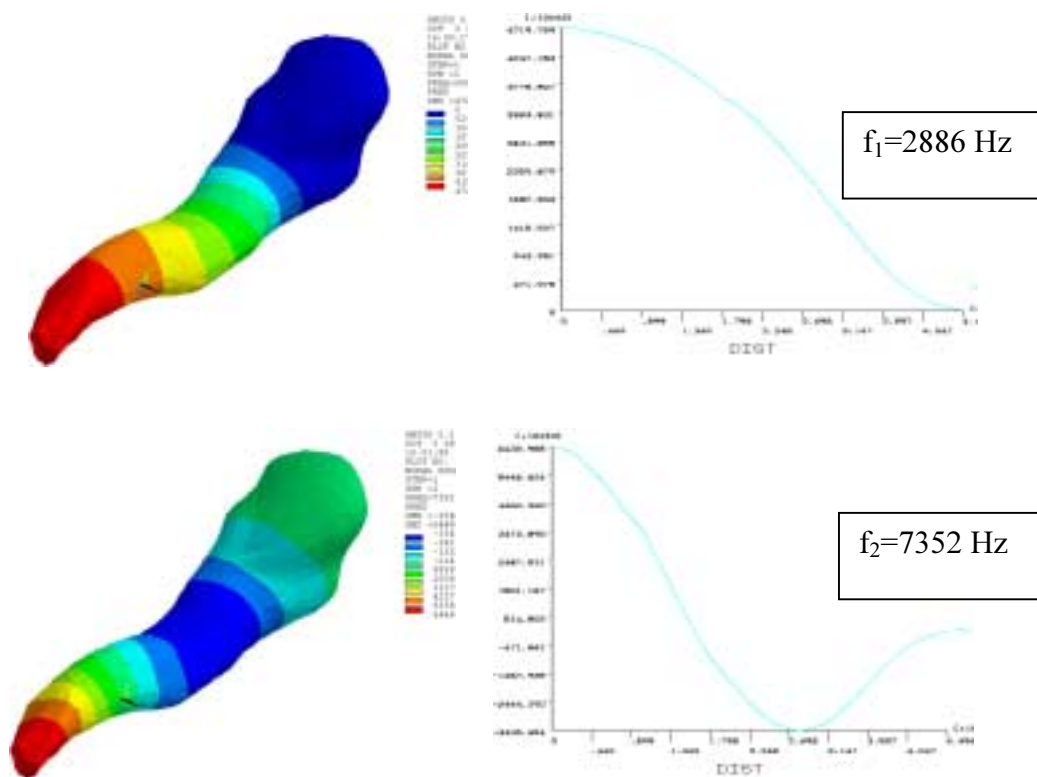


Obr. 2 Závislost součinitele stěnové pohltivosti na frekvenci pro měkkou lidskou tkáň (bubínek) podložené kostní vrstvou pro různé hodnoty tloušťky měkké tkáně  $d_2$ ; tloušťka kostní vrstvy  $d_3=5\text{mm}$

není překvapující uvědomíme-li si, že absorpce v oblasti rezonance snižuje konstruktivní interferenci velkého počtu násobných vln. V oblasti rezonančních odrazných frekvencí je proto možné předpokládat příznivý poměr signál/šum z hlediska úlohy určování vnitřní absorpce. Při známé geometrii odrazných vrstev je tedy zřejmě možné pomocí maticové metody zjišťovat hodnoty vnitřní absorpce materiálu na základě interpretace křivek naměřené zvukové pohltivosti stěn. Tímto způsobem byly např. interpretovány výsledky měření v impedanční trubici zmiňované v práci [9].

### 3.3 Přenosové vlastnosti zevního zvukovodu

Využití možnosti uvažovat polohu přijímače i uvnitř tenkovrstevnatého prostředí si ukážeme na případu zevního zvukovodu. Oprávněnost použití vrstevnatého modelu pro frekvence nižší než 8kHz přitom vyplývá z výsledků modální analýzy akustického subsystému zevního zvukovodu, která byla provedena v rámci systému Ansys. Pro první dva mody na frekvencích  $f_1=2886$  Hz a  $f_2=7352$ Hz (viz obr.3) je zřejmé, že rozložení tlaku v oblasti bubínku je možné považovat za prostorově homogenní a tvary kmitů jsou symetrické vzhledem k zalomené ose zvukovodu. Tuto skutečnost potvrdily i výsledky experimentálních měření v práci [10]. Jak však ukázalo statistické zpracování měření geometrie zevního zvukovodu prováděné na více osobách [11], u lidských



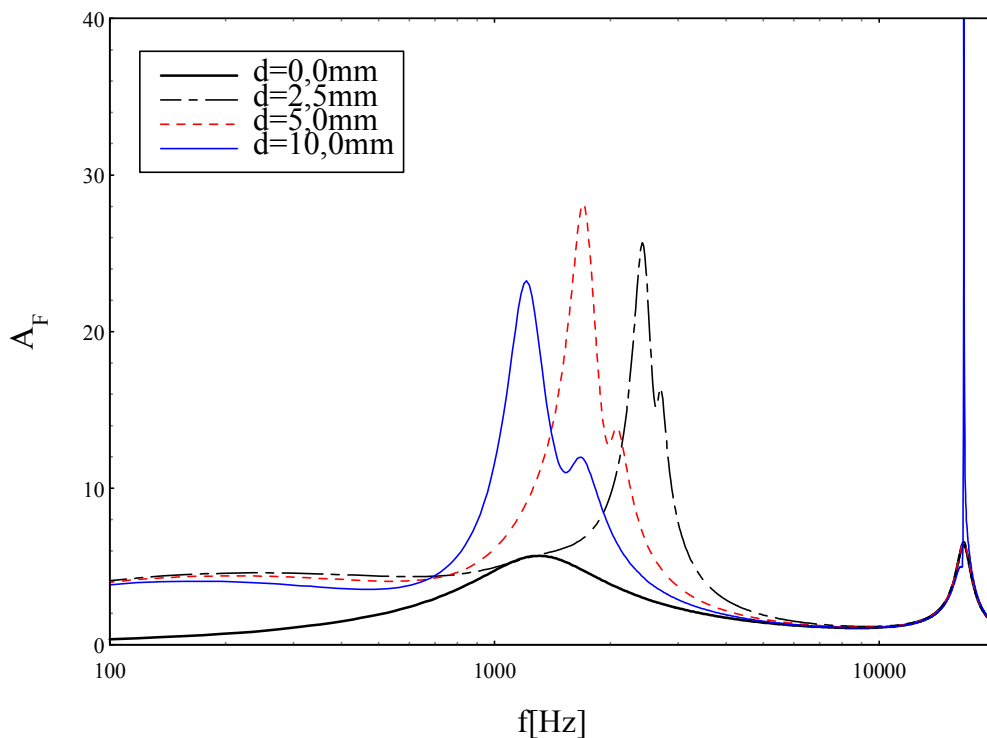
Obr. 3 Tvary kmitů kavity zevního zvukovodu (a) a průběh akustických tlaků podél osy zvukovodu pro první dvě vlastní frekvence

zvukovodů sice existuje jistá variabilita v detailech, ale společným znakem je rozšíření průměru zvukovodu před bubínkem. Zevní zvukovod, bubínek a středoušní dutina byly proto modelovány ve tvaru válce s měnícím se průřezem. Jak aplikovat maticovou metodu na tomto typu modelu tj. při změně průřezu válce je detailně rozebráno v práci [12].

Z hlediska percepce zvuku mají zřejmě rozhodující vliv vibrace bubínku a s nimi související pohyby kůstek středního ucha. Vibrace bubínku jsou přitom určeny jeho vlastními kmity, dynamickými vlastnostmi sluchových kůstek a amplitudovou charakteristikou budící síly. Pro hodnotu budící síly však není rozhodující pouze tlak před bubínkem (jak bývá v literatuře často zmiňováno), ale svoji roli také hrají tlakové poměry za bubínkem. Ty jsou ovlivněny hlavně rezonancemi v dutině středního ucha. Závislost budící síly na frekvenci  $A_F(f)$  tedy můžeme zjistit z rozdílu tlaků vypočítaných pro polohu příjmu na přední a zadní straně bubínku tj.

$$A_F(f) = \left| \left[ S_p^{*f}(f) - S_p^{*b}(f) \right] \frac{P_o}{P_m} \right|, \quad (8)$$

kde  $S_p^{*f}(f)$  a  $S_p^{*b}(f)$  jsou komplexní přenosové charakteristiky tlaku pro polohu přijímače před a za bubínkem,  $P_o$  je plocha vstupního otvoru zevního zvukovodu a  $P_m$  je plocha bubínku. Vypočtené amplitudové charakteristiky síly pro různé průměry  $d$  dutiny středního ucha jsou na obr.4. Jak je z tohoto obrázku zřejmé, dutina středního ucha přispívá ke zvýšení  $A_F(f)$  na frekvencích 800Hz-5000Hz. S rostoucí šířkou dutiny středního ucha  $d$  se přitom příslušné maximum přesouvá k nižším



Obr. 4 Závislost budící síly  $A_F$  síly působící na bubínek pro různé průměry  $d$  dutiny středního ucha

frekvencím. Délka rozšířené části zvukovodu polohu prvního maxima křivek  $A_F(f)$  prakticky neovlivňuje, má vliv pouze na výraznost maxim [13].

## 4 Aplikace paprskových metod na modelech třírozměrných struktur

Pro obecná třídímní prostředí je vývoj autonomních modelovacích procedur s příslušnými grafickými výstupy značně časově náročný. Proto se zmíníme o aplikacích systému Raynoise [14].

### 4.1 Modelování hluku v kabině vozidel

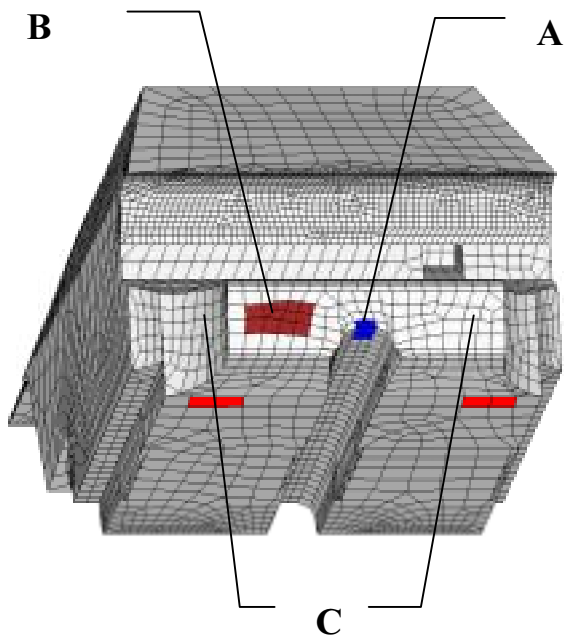
Aplikace systému Raynoise při studiu šíření hluku v kabině vozidel byla provedena na modelu kabiny vozidla Škoda Felicia. Kabina byla proměřena pomocí systému měření vzdáleností význačných uzlů (definujících jednotlivé povrchy) od tří pevných bodů. Tyto hodnoty byly následně přepočítány na kartézské souřadnice globálního souřadného systému. Přestože systém Raynoise umožňuje vytvářet jednoduché geometrické modely, vzhledem ke složitosti struktury kabiny bylo generování sítě plošných elementů (SHELL63) vymežujících prostor kabiny provedeno v rámci systému Ansys.

Na základě diskuse s pracovníky ve výrobním závodě Škoda Mladá Boleslav byly vytipovány tři hlavní zdroje hluku: *zdroj A*- koleno výfuku, které bylo aproximováno bodovým zdrojem mimo vnitřní prostor kabiny vozu, průchod akustické energie do kabiny byl modelován pomocí transmisních panelů; *zdroj B*- vibrující podlážka pod nohy spolujezdce; *zdroj C*- výztuhy karoserie pod podlahou. Model kabiny a lokalizace uvedených zdrojů jsou na obr. 5.

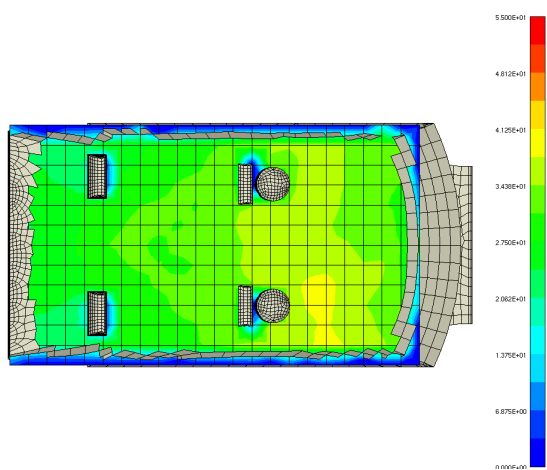
Mapa izolinií rozložení hluku v kabině vypočtená pro 1kHz v horizontální pozorovací rovině umístěné v úrovni hlav pasažérů je na obr. 6, pro hodnoty vyzařovaného výkonu hluku byly použity výsledky měření intenzitní sondou. Z této mapy je zřejmé, že rozložení hluku v kabině je značně nehomogenní, např. rozdíl v hodnotách akustického tlaku na předních a zadních sedadlech je až 4dB.

Výhodou paprskových metod je to, že umožňují znázorňovat toky šíření akustické energie pomocí paprsků a tak „vytipovat“ odrazné plochy, které při dané poloze zdrojů nejvíce přispívají k hluku v daném místě. Např. analýza paprskových diagramů pro zdroj hluku od výfuku ukázala [15], že pro pasažéry na předních sedadlech jsou zřejmě významné odrazy od stěn prostoru pro nohy, bočních dveří a střechy. Podrobnější diskuse modelování účinku pokrývání těchto ploch materiály s vysokou pohltivostí je provedena v práci [16].

Výhodou paprskových metod je to, že známe časy příchodu jednotlivých vln, tj. znalost impulsní stopy. Analýza impulsní stopy pak umožňuje odhad charakteru hluku z hlediska psychoakustiky popř. hledat vhodná místa pro umístění reproduktorů autorádia [17].



Obr. 5 Model kabiny a poloha předpokládaných zdrojů hluku v kabině vozidla Škoda Felicia



Obr. 6 Rozložení hluku v kabině vozidla Škoda Felicia

## 4.2 Modelování hluku ze silniční dopravy

V současné době jsou většinou pro predikci dopravního hluku používány procedury založené na empirických vztazích, které v podstatě provádějí korekci přímé vlny na překážky v okolí dopravní komunikace. Platnost těchto korekcí je však omezena na standardní dopravně-urbanistické situace. Proto tyto procedury pochopitelně nemohou postihnout některé zvukové efekty, které se mohou vyskytnout v případě složité konfigurace terénu. V tomto případě je modelování šíření hluku pomocí paprskových metod prakticky nezastupitelné.

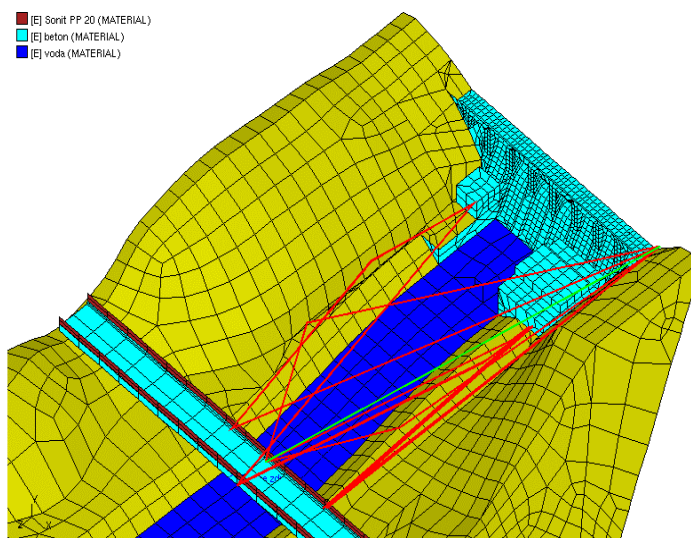
Zvláštním a z hlediska modelování dopravního hluku dosti zásadním problémem je predikce účinnosti navrhovaných protihlukových bariér. V rámci systému Raynoise je tento problém řešen pomocí Kurzeových-Andersonových vztahů [18] vycházejících z geometrické teorie difrakce.

Aplikaci 3D modelování paprskovou metodou si ukážeme na úloze predikce hluku v okolí projektovaného mostu rychlostní komunikace R43 v blízkosti brněnské přehrady. Tato lokalita je zajímavá jednak z hlediska konfigurace terénu a jednak proto, že otázka hluku je zde významná z důvodu blízkosti občanské výstavby a rekreační zóny. V systému ANSYS byl vytvořen geometrický model reliéfu terénu, navrhovaného mostu a přehradní hráze. Možnost identifikace a vyhodnocení dynamiky vlny přímé, vlny difragované na modelované silniční bariéře a vln odražených od údolních svahů řeky Svratky pomocí paprskových diagramů je zřejmá z obr.7. Modelování pomocí systému Raynoise ukázalo, že vlny odražené od svahů přemostěného údolí mohou způsobovat přenos hluku i na relativně velké vzdálenosti a mohou zapříčinit překročení limitních hodnot hluku pro danou lokalitu [19].

## 4.3 Studium efektu šeptající galerie

V literatuře zabývající se stavební akustikou je znám zvláštní akustický jev, který se někdy nazývá „efekt šeptající galerie,“ nebo „efekt šeptající zdi“. Tento jev spočívá v přenosu hovoru dvou osob stojících v těsné blízkosti opačných rohů poměrně rozlehlých místností. Termín efekt šeptající galerie je však také někdy používán i pro přenosový jev vln mezi vysílačem a přijímačem (a to i vln elektromagnetických) při jejich polohách v ohniscích elipsy odrazných povrchů.

V akustice je efekt šeptající galerie zpravidla objasňován koncentrací akustické energie do jednoho místa, přitom se předpokládá šíření vln pouze v akustickém prostředí (Airyho hypotéza). Toto vysvětlení je zřejmě postačující pro zmiňovaný příjem v ohniscích rotačních elipsoidů

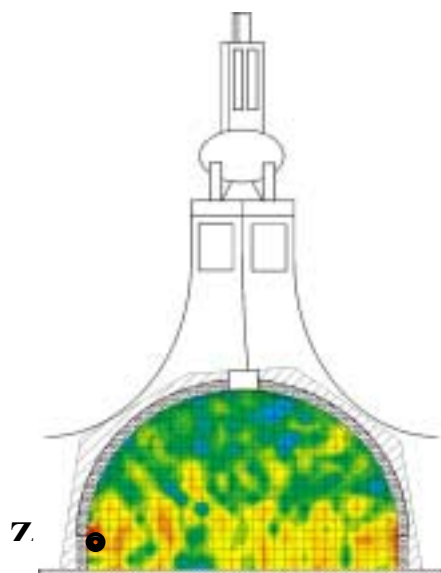


Obr. 7 Model mostu dálničního přivaděče R43 v Brně-Bystřici s vyznačením paprskových diagramů přímé vlny, vln difragované a vln odražených

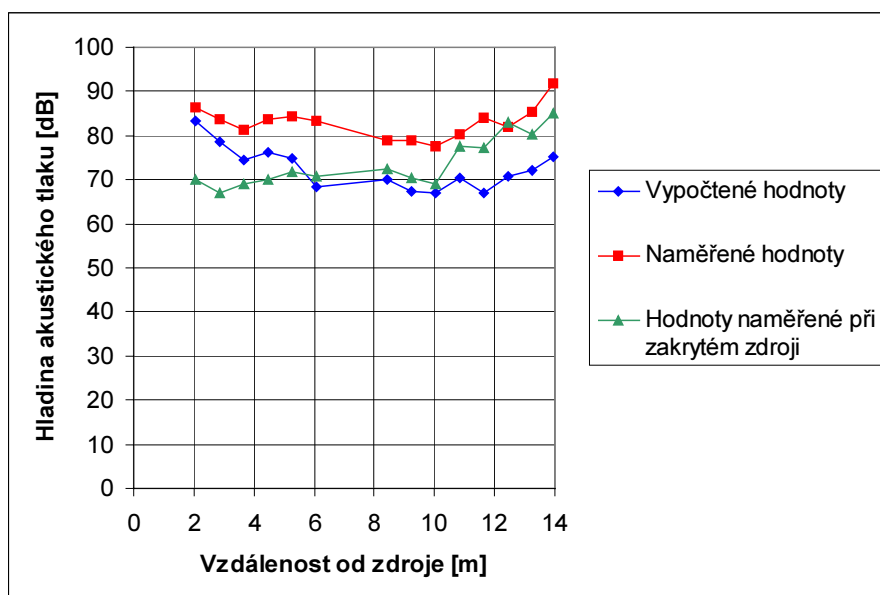
nebo paraboloidů. Tato interpretace je však méně zřejmá pro objasnění komunikace mezi osobami v opačných rozích místnosti, kdy ani zdroj ani přijímač není v ohnisku ploch vytvářejících klenbu. V tomto případě je podstata jevu vysvětlována existencí tzv. zvaných „vln šeptající galerie“, které se šíří v pevnofázovém prostředí v blízkosti kontaktu s prostředím fluidním, v daném případě uvnitř klenby stropu (Rayleighova hypotéza). Více než v akustice je šíření těchto vln zmiňováno v seismologii [19], kde jsou tyto vlny popisovány pomocí komplexního eikonálu jako vlny slabě refragované (někdy také vlny zanořující) a jejich výskyt je podmiňován existencí vrstev s gradientem rychlosti.

Na základě konfrontace výsledků experimentálního měření a matematického modelování paprskovou metodou byla provedena diskuse obou hypotéz vzniku jevu šeptající galerie v budově památníku Mohyly míru u Slavkova. Pro účely matematického modelování byl v systému ANSYS vytvořen prostorový model haly Mohyly míru. Pro síť konečných prvků byly použity skořepinové prvky SHELL63, které umožnily přesné namodelování zaoblení klenby stropu. Nejdříve byl proveden výpočet přenosové funkce v pásmu 100-1000Hz. Poloha zdroje přitom odpovídala osobě šeptající v rohu místnosti (bodový zdroj ve výšce 1,65m ve vzdálenosti 0,2m od rohu klenby), pro omítku a kamenou podlahu byly uvaženy příslušné Sabinovy absorpční koeficienty. Při výpočtu hladin akustického tlaku byla uvažována superpozice přímé vlny a vln násobně odražených s ohledem na fázi. Výsledky výpočtů ukázaly na celkový trend poklesu přenosové funkce s frekvencí, nejvyšší lokální maximum bylo zjištěno pro 190Hz [20]. Pro tuto frekvenci pak byl proveden výpočet mapy akustického tlaku ve svislé rovině procházející úhlopříčkou haly (obr. 8).

Výsledek potvrzuje pozorovaný jev, tj. poměrně vysoké hodnoty tlaku v blízkosti rohu místnosti opačného ke zdroji. Zajímavé je srovnání výsledků matematického modelování s výsledky experimentálního měření provedeného na profilu podél úhlopříčky haly. Při měření byl jako zdroj použit kazetový magnetofon, ve kterém byl vložen kazetový nosič s nahrávkou obsahující jednotlivé oktávy frekvence v rozsahu 125 až 8000 Hz, jejich přecejchování na stejnou úroveň vysílaného signálu bylo provedeno pomocí systému Pulse. Měření bylo provedeno ve dvou



Obr. 8 Mapa izolinií akustického tlaku ve svislé rovině jdoucí úhlopříčkou haly Mohyly míru pro frekvenci 190Hz, zdroj umístěn v levém rohu



Obr.9 Závislost vypočtených a naměřených hodnot akustického tlaku na vzdálenosti od zdroje pro frekvenci 500Hz. Hodnota vzdálenosti 14m odpovídá poloze přijímače v opačném rohu místnosti než je zdroj



variantách, jednou při nezakrytém zdroji a jednou byl zdroj ve směru do místnosti zakryt minerální vatou o tloušťce 20 cm. Cílem měření při zakrytém zdroji bylo posouzení podílu signálu šířícího se vzduchem a signálu šířícího se klenbou stropu.

Na obr. 9 je provedeno srovnání vypočtených a naměřených hodnot akustického tlaku na profilu podél úhlopříčky haly při umístění zdroje v těsné blízkosti rohu haly. Z tohoto obrázku je zřejmé, že od středu místnosti při přibližování přijímače k opačnému rohu haly dochází u všech křivek ke zvyšování hodnot tlaku i přes rostoucí vzdálenost zdroj-přijímač. Tento jev je zřejmě podmíněn koncentrací odražených vln se stejnou fází v opačném rohu haly. Zároveň však dochází ke snižování rozdílu mezi hodnotami tlaku naměřenými při odkrytém a zakrytém zdroji. Přitom za předpokladu šíření zvuku jen vzduchem zakrytí zdroje minerální vatou tloušťky 20cm by mělo odpovídat stálému snížení naměřených hodnot o 15dB [21], což nastává pouze v počáteční oblasti obou experimentálních křivek. Tento druhý efekt je zřejmě možné vysvětlit jen tím způsobem, že při přibližování přijímače k opačnému rohu haly začíná k signálu šířícímu se do přijímače pouze vzduchem přispívat i signál šířící se strukturou klenby tj. přítomností vlny šeptající galerie. Hodnota tohoto příspěvku je pro konfiguraci zdroje a přijímače v opačných rozích haly a frekvenci 1kHz kolem 10 dB.

Výskyt vln šeptající galerie je záležející z hlediska geometrické akustiky, jejíž principy jsou základem běžných komerčních modelovacích procedur používaných v současné architektonické akustice. Hodnota standardních transmisních koeficientů pro rozhraní vzduch-strop je totiž natolik malá, že dynamika signálu vln refragovaných do klenby stropu se zdá být zanedbatelná. Objasnění a zdůvodnění výskytu vln šeptající galerie v rámci paprskových metod je však možné na základě uvážení vyšších členů paprskové řady - viz rovnice (2). Diskuse vln šeptající galerie by přitom mohla mít význam pro stavební akustiku a to nejen z důvodu přenosu zvuku na větší vzdálenosti ale také z důvodu zachování jeho kvality. Vlny šeptající galerie by mohly hrát zřejmě roli i při objasnění tzv. kostního slyšení popř. z hlediska protihlukových opatření (s vlnami šeptající galerie úzce souvisí koincidenční jevy).

## **5 Implementace absorpčních jevů do výpočetních procedur akustického modelování**

Význam absorpce při modelování reálných akustických systémů není třeba zdůrazňovat. Přesto současné výpočetní systémy při modelování akustických polí zpravidla uvažují jen monochromatickou absorpci popř. absorpci jen na površích materiálů. Sestavit formálně pohybové rovnice tak, aby výsledek dával lineární operátor, jehož řešení by odpovídalo experimentálním hodnotám absorpce v širším oboru frekvencí, podmínkám kauzality a příslušným konstitutivním

vztahům však činí potíže. Jak je ukázáno v práci [22], tomuto požadavku však můžeme vyhovět, jestliže absorpci akustických vln budeme považovat za superposicí více mechanismů, jejichž uplatnění se s frekvencí mění (viskoelasticita, rozptyl na různých nehomogenitách, pohyb kapaliny nebo vzduchu uvnitř pórů apod.).

Dalším problémem implementace absorpce do modelovacích procedur souvisí s výraznou frekvenční závislostí součinitele absorpce elastických vln u většiny látek. Elastické konstanty v Helmholtzových rovnicích by proto měly být obecně považovány za frekvenčně závislé veličiny. V akustice však často pracujeme s výraznými akustickými rozhraními, mezi kterými mohou vznikat „ostré“ rezonance, což vyžaduje poměrně jemné vzorkování ve frekvenční oblasti. Při numerickém řešení Helmholtzových rovnic se pak frekvence stává další proměnou, což neúměrně zvyšuje nároky na rychlost výpočtů a paměť počítače. Proto si zmíníme jinou možnost zohlednění absorpčních jevů a to pomocí korekce dokonale elastického řešení.

### 5.1 Uvážení absorpce pomocí korekce vzorků impulsní stopy

Při známé době času příchodu vlny  $\tau$  můžeme změnu tvaru vstupního signálu  $w_0(t)$  v důsledku frekvenčně závislé absorpce vyjádřit pomocí konvoluce s disipačním operátorem  $D(t, \tau)$

$$w_a(t) = D(t, \tau) * w_0(t - \tau), \quad (9)$$

kde  $D(t, \tau)$  zjistíme z Fourierovy transformace kauzálního frekvenčního filtru popisujícího průchod elastického vlnění absorbujícím prostředím [4]. Na impulsní stopu akustického systému  $r(t)$  vypočítanou bez uvážení absorpce se můžeme dívat jako na superposici elementárních vln pro vstupní signál ve tvaru delta funkce  $\delta(t)$

$$r(t) = \sum_{k=0}^{k=N} r_k \delta(t - \tau_k), \quad (10)$$

kde  $r_i = r(t_i)$ . Pokud vyloučíme výskyt vln různých typů tj. neuvažujeme-li konverzi vln, pak položíme-li  $w_0(t) = \delta(t)$  můžeme za pomoci vztahu (9) zjistit impulsní stopu pro absorpčně homogenní systém  $r_a(t)$  na základě korekce každého vzorku funkce  $r(t)$  tj.

$$\begin{aligned} r_a(t) &= \sum_k r_k \delta_a(t - \tau_k) = \sum_k \sum_n r_k D(t - \tau_k; \tau_n) \delta(t - \tau_k - \tau_n) = \\ &= \sum_n r_n D(t - \tau_n; \tau_n). \end{aligned} \quad (11)$$

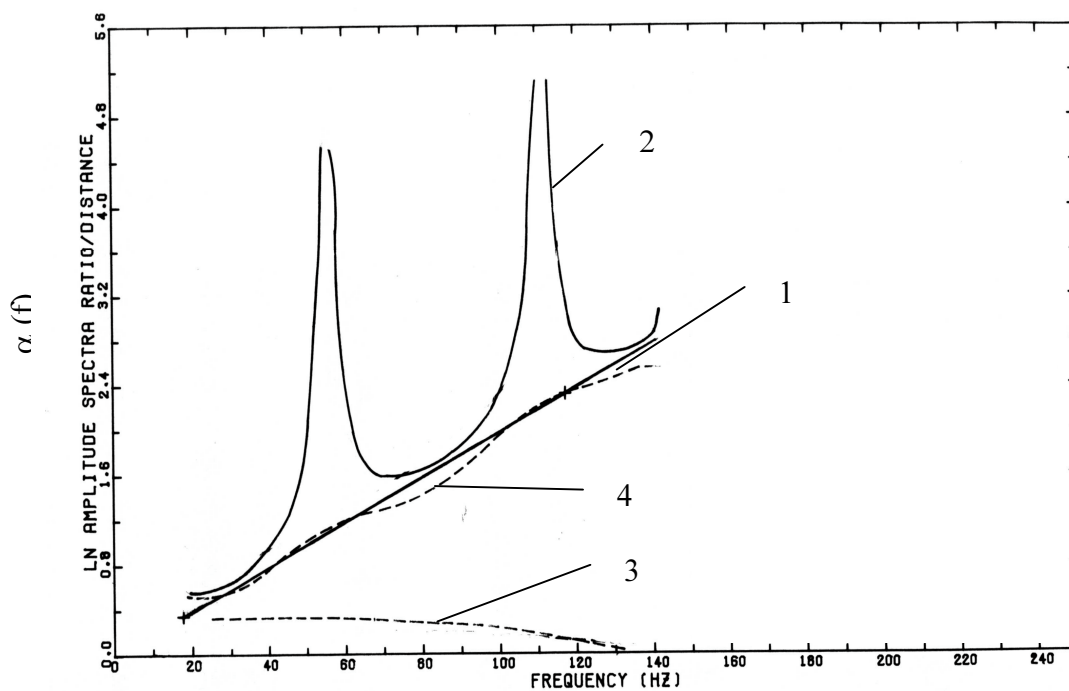
To znamená, že pohybové rovnice absorbujících prostředí nemusíme řešit pro  $N$  hodnot frekvenčně závislých modulů, ale absorpci můžeme zohlednit pomocí  $N$  Fourierových transformací, které jsou však provedeny sekvenčně. Z hlediska paměti počítače je to rozhodně efektivnější než zavádění frekvence jako další proměnné při numerickém řešení Helmholtzových rovnic. Další výhodou je také to, že po výpočtu modelu bez absorpce můžeme aplikovat buď různé modely viskoelastických

prostředí nebo měnit hodnoty absorpčních parametrů aniž bychom museli opakovat výpočet přenosové funkce.

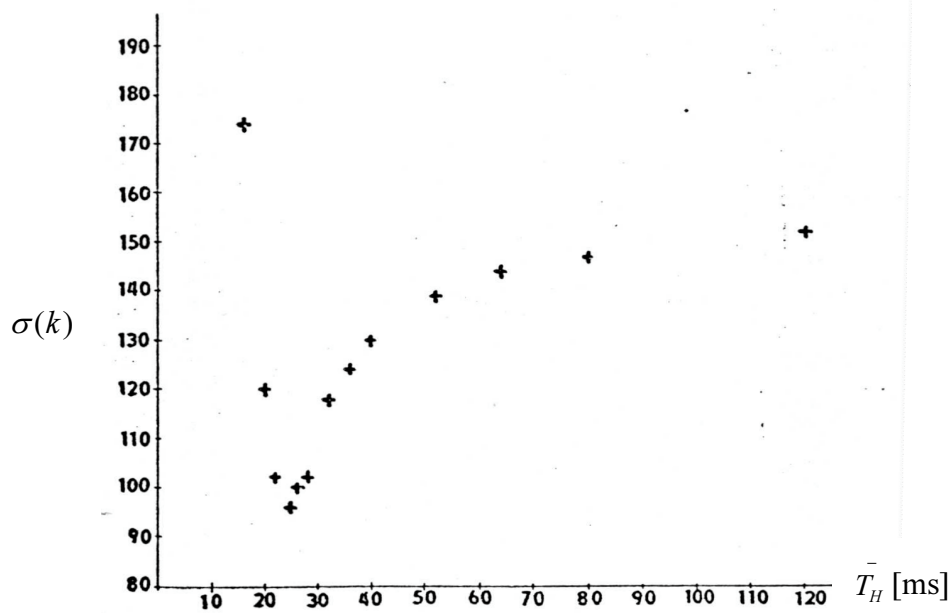
## 6 Aplikace cepstrální filtrace při určování absorpce

Přestože absorpce akustických vln je v akustice významným parametrem (zejména při modelaci protihlukových opatření), její hodnoty jako materiálového parametru jsou známy jen pro omezený počet materiálů a i tyto hodnoty vykazují v rámci jednoho materiálu poměrně značný rozptyl. Hlavním důvodem jsou experimentální chyby, jejichž relativní hodnota je obecně mnohem vyšší než u jiných akustických parametrů jako je např. rychlost elastických vln. Základní metodou pro určování absorpce elastických vln je spektrální metoda, při které se zjišťuje nárůst součinitele absorpce  $\alpha(f)$  z logaritmu podílu amplitudových spekter signálů naměřených při různých vzdálenostech vysílač-přijímač. Přitom hlavním problémem jsou oscilace vyvolané interferencemi sledovaného signálu s poruchovými vlnami s krátkým časovým zpožděním tzv. "ghostů". Tyto oscilace překrývají vyhodnocovaný nárůst absorpce s frekvencí a nelze je odstranit standardními filtrace v časové nebo frekvenční oblasti [23]. V časové oblasti potřebný filtr již značně ořezává sledovaný signál včetně jeho části, která je nositelkou informace o absorpci. Podobně není efektivní ani použití nízkofrekvenčních filtrů (např. klouzajícím aritmetickým průměrem), protože oscilace vyvolané krátkozpožděnými interferencemi mají samy nízkofrekvenční charakter.

Z tohoto důvodu byla pro tento účel testována pomocí syntetických dat vygenerovaných paprskovou metodou cepstrální filtrace. Efektivita použití ostrého cepstrálního filtru pro odstranění vlivu "ghostu" na vyhodnocovaný lineární nárůst  $k$  součinitele absorpce  $\alpha(f)$  je zřejmá z obr. 10. Jak je z tohoto obrázku patrné, cepstrální filtrace působí na funkci  $\alpha(f)$  jako zhlazovací filtr, který však zachovává u filtrované funkce vyhodnocovaný lineární trend. Z hlediska praktického používání cepstrální filtrace je důležité zjistit jak ostré mohou být používané cepstrální filtry aniž by zkreslovaly informaci o absorpci. Pro tento účel bylo provedeno matematické modelování šíření vln na modelu vrstevnatého, absorbujícího prostředí [24]. Na těchto syntetických datech pak byla aplikována obrácená úloha na absorpci s využitím cepstrální filtrace. Jak je zřejmé z obr. 11, při určování absorpce spektrální metodou je nejvýhodnější délka filtru odpovídající jedné třetině časové délky analyzovaného signálu.



Obr.10 Odstranění vlivu echa při vyhodnocování absorpce: 1-skutečný průběh absorpce  $\alpha(f)$ , 2-zkreslení vlivem interference s krátkozpožděným echem, 3-výsledek ostré časové filtrace, 4-výsledek ostré cepstrální filtrace



Obr. 11 Závislost standardní kvadratické chyby v určení absorpce  $\sigma(k)$  na délce cepstrálního filtru  $T_H$ . Časová délka analyzovaného signálu  $T=64$ ms.

## 5 Závěr

Paprskové metody mají v současné akustice řadu uplatnění a v některých případech jsou i nezastupitelné. Jejich hlavní výhodou je rychlost výpočtů, možnost predikce šíření akustických vln i na velké vzdálenosti od zdroje, možnost identifikace jednotlivých zdrojů hluku, výrazně odražejících ploch a poměrně jednoduché uvážení frekvenčně závislé absorpce.

Problém šíření tlakových vln přes vrstevnatá, absorbující prostředí, je v práci řešen pomocí maticové metody. Úloha je přitom vyřešena i pro případ zdroje umístěného uvnitř prostředí, takže je možné provádět i predikci účinnosti obložení vibrujících struktur. Odvozené vztahy pro přenosovou funkci umožňují teoretický výpočet součinitelů stěnové absorpce, stupně neprůzvučnosti stavebních příček a složených oken. Úloha je řešena i pro impulsní zdroje, takže je možná i modelace šíření signálů v časové oblasti a to jak akustické výchyly tak i akustického tlaku. Např. pro kombinované stavební příčky je ukázáno, že pro zabránění rezonačním přenosům na frekvencích vyšších než 1,5kHz je nutné vyplňovat vzduchové mezery lehkými, silně absorbujícími materiály, pro frekvence nižší než 250 Hz je naopak vhodnější používání výplní s vyšší měrnou hmotností. Provedené výpočty frekvenční závislosti součinitele absorpce stěn ukazují na to, že v oblasti rezonančních frekvencí je amplituda odražených vln značně citlivá na hodnotu absorpce materiálu tvořícího odraznou stěnu, což umožňuje využití odvozených vztahů pro řešení obrácené úlohy na absorpci.

Na základě výsledků modální analýzy provedené v rámci systému Ansys na modelu zevního zvukovodu je ukázáno, že do 8kHz tvary kmitů odpovídají azimutálním kmitům podél zalomené osy zvukovodu s tím, že detaily v reliéfu zvukovodu na tvar kmitů do této frekvence nemají vliv. Pro sledování přenosových vlastností zevního zvukovodu je proto použita maticová metoda s tím, že jsou popsány její úpravy umožňující uvážení rozšíření zvukovodu před bubínkem. Vypočítané přenosové funkce akustického tlaku pro polohu přijímače před bubínkem vykazují poměrně dobrou shodu s experimentálními daty. Z rozdílu tlaků vypočítaných pro polohu přijímače před a za bubínkem je provedena analýza síly působící na bubínek. Výsledky ukazují na to, že tvar zevního zvukovodu a dutina středního ucha může hrát roli z hlediska objasnění známého snížení prahu slyšitelnosti lidí v oblasti frekvencí kolem 2kHz. Zároveň je prokázáno, že druhá maxima experimentálně naměřených křivek SPL v oblasti kolem 8kHz z hlediska percepce zvuku zřejmě významná nejsou.

Pro vozidlo Škoda Felicia je provedeno pomocí systému Raynoise studium šíření hluku v kabině motorového vozidla. Na základě srovnání map akustických tlaků pro tři zdroje hluku vytipované ve výrobním závodě je ukázáno, že k hluku v kabině nejvíce přispívají vibrace podlahy pod nohama spolujezdce. Výpočetní simulace obložení stěn obklopujících prostor pro nohy, podlahy a stropu vozu materiálem s vysokou pohltivostí ukazuje na možnost docílení poklesu

hladiny hluku v místě ucha řidiče až o 4,5dB. Zároveň je však ukázáno, že takové úpravy mohou mít za následek zhoršenou kvalitu přenosu zvuků z hlediska psychoakustiky, tj. mohou mít např. dopad na kvalitu poslechu autorádia popř. srozumitelnost mluvené řeči.

Možnosti aplikace paprskové metody pro studium šíření silničního hluku je prezentována na příkladu projektovaného přemostění údolí řeky Svratky rychlostní komunikací R43 v Brně-Bystřici. Výpočty prokazují významnost odražených vln od svahů laterálního zářezu, které přispívají k hladině hluku v okolí komunikace o více než 3dB, což je již hodnota převyšující přesnost měřicích přístrojů. Pro případ jednoduché silniční bariéry je ukázáno, že v důsledku difrakce vln na bariéře hladina hluku od nákladního vozidla pro některé polohy vozidla na mostě přesahuje hodnoty přípustné pro danou lokalitu podle normy.

Na základě konfrontace výsledků matematického modelování a výsledků experimentálních měření provedených v prostoru haly památníku Mohyly míru je objasněna podstata jevu šeptající galerie v tomto objektu. I když hlavní příčinou jevu je fokusace pole odražených vln v opačném rohu haly, k celkovému efektu přispívají také 10dB vlny šířící se jako slabě refragované vlny klenbou stropu.

Pro viskoelastická prostředí je provedena klasifikace jednotlivých modelů absorbujících prostředí s tím, že za předpokladu současného působení více mechanismů absorpce s různými relaxačními časy je možné základní modely absorbujících prostředí popsat pomocí modelu s činitelem jakosti prostředí nezávislejícím na frekvenci. Problém implementace absorpčních jevů do výpočetních procedur modelování akustických vlnových polí je pak řešen pomocí korekce vzorků impulsní stopy neabsorbujícího prostředí.

Pomocí matematického modelování je prokázána účinnost cepstrální filtrace při řešení obrácené úlohy na absorpci. Z hlediska potlačení vlivu krátkozpožděných poruchových vln je ověřeno, že z hlediska tvaru filtru je pro cepstrální filtraci výhodné používání liftrů ve tvaru pravostranných Hammingových oken. Z hlediska jejich délky jako optimální hodnota byla zjištěna quefrenční délka odpovídající jedné třetině časové délky měřicího signálu.

## Literatura

- [1] M. Kline, I.W. Kay: Electromagnetic theory and geometrical optics. Interscience, New York 1965.
- [2] V. Červený, I.A. Molotkov, I. Pšenčík: Ray Method in Seismology, Praha 1977
- [3] K. Pellant : Noise Prediction Using the High Frequency Method of Elastic Wave Field Modelling. ACTA ACUSTICA, vol.82, Suppl.1, S.Hirzel Verlag- EAA 1996
- [4] G. Müller : Rheological properties and velocity dispersion of a medium with power-law dependence of Q on frequency, J.Geophys., 54 ,20-33, 1983
- [5] K. Pellant : Modelling of absorptive acoustic waves. Proceedings of ISMA23, Conference "Noise and Vibration Engineering ", Volume II, p.615-622, Leuven 1998
- [6] V. Červený, K. Pellant: Matričnyj metod rasčota sintetičeskich seismogramm v vertikalno-něodnorodnoj sredě. Programma SYNTHA. Zpráva KOC RVHP, Geofyzika Brno 1982
- [7] K. Pellant: Acoustic Characteristics of Layered Media with Frequency Dependent Absorption and Velocity Dispersion. Proceedings of 10th International Conference on Noise Control " Noise Control '95 , p. 171-176, Warsaw 1995
- [8] K. Pellant: Vztah ztrátových činitelů metody SEA a materiálových dissipačních parametrů. Seminář „Interakce a zpětné vazby ‘2000“, 157-164, Praha 2000
- [9] V. Mišun, A. Rindtová: Absorpční vlastnosti měkkých tkání vokálního traktu. Sborník semináře „ Interakce a zpětné vazby ‘99., 127-134, ÚT AV ČR Praha 1999
- [10] M.R. Stinson, S.M. Khanna: Sound propagation in the ear canal and coupling to the eardrum, with measurements on models systems. J. Acoust. Soc. Am. 85,p.2481-2491,1989
- [11] M.R. Stinson, B.W. Lawton: Specification of the geometry of the human ear canal for the prediction of sound-pressure level distribution. J. Acoust. Soc. Am. 85, p.2492-2503,1989
- [12] K. Pellant, J. Mejzlík, A. Pellant: Výpočet přenosových charakteristik zevního zvukovodu maticovou metodou. Sborník semináře „ Interakce a zpětné vazby ‘99. ÚT AV ČR Praha, 143-150, 1999
- [13] K. Pellant, J. Šremr, J. Mejzlík , A. Pellant: Berechnung der akustischen Parameter des äusseren Gehörganges an einem mathematischen Modell. 9. Jahrestagung der Vereinigung mitteldeutscher Hals-Nasen-Ohrenärzte, Marburg 2000
- [14] RAYNOISE rev. 3.0, System for Building Acoustics and Industrial Noise Simulation analysis. Numerical Integration Technologies, Leuven 1997
- [15] K. Pellant: Modelování hluku v kabině vozidla Škoda Felicia. Sborník konference „ Transfer ‘99“, ISBN:80-214-1341-7, K39 –406, VUT Brno 1999
- [16] K. Pellant, K. Příkryl: Modeling of noise in vehicle cab. Proceedings of 7th International Congress on Sound and Vibration, p. 2727-2734, Garmisch-Partenkirchen 2000
- [17] U.J. Kurze, G.S. Anderson: Sound Attenuation by Barriers. Appl.Acoust. 4, 35-53, 1971
- [18] K. Pellant: Modelování hluku v kabině vozidel. Sborník národní konference s mezinárodní účastí „Inženýrská mechanika ‘99, 177-182, Svratka 1999
- [19] V. Červený, I.A. Molotkov, I. Pšenčík: Ray Method in Seismology, Praha 1977
- [20] K. Pellant, M. Mejzlík, K. Příkryl: Waves of whispering Gallery. Sborník národní konference s mezinárodní účastí „Inženýrská mechanika, Svratka 2001
- [21] L.L. Beranek: Snižování hluku.SNTL Praha 1965
- [22] K. Pellant: Modelling of absorptive acoustic waves. Proceedings of ISMA23, International conference "Noise and Vibration Engineering ", Volume II, , p.615-622, Leuven 1998
- [23] K. Pellant: Attenuation coefficient from Amplitude and Phase Spectra of Vertical Seismic Profiling. Applied Geophysics 21, p. 97-116, 1986
- [24] K. Pellant: Les Possibilites d'utilisation de l'attenuation des ondes elastiques pour la prospection des hydrocarbures par les methodes sismiques. These PGS UK, Praha 1988

### Summary

Problems of sound wave propagation and acoustic wave field modeling play an important role in various branches of acoustics. There are two main approaches to the investigation of acoustic waves in complicated cases: approximate methods (such as ray method) and methods based on direct numerical solution of elastodynamic equations (such as finite element method). Approximate methods can be used to study the propagation of elastic waves in rather complicated and voluminous cases of source-path-receiver framework. Mention may be made to the calculation and assessment of traffic noise exposure, sound power level predictions in workshops, noise control of machines, sound wave studies in the architectural acoustics etc. This work is devoted to the ray method, to its possibilities and limitations, and to its applications.

The fundamental principles of the ray method have been known for a long time, the first acoustical applications occurred at the end of 19. century. Starting from the second half of the last century, there is a more or less continuous effort to extend the applicability of the ray method also for absorbing media, for certain important classes of surface waves and in irregular ray fields (such as critical angle of incidence, caustic points etc.).

In dealing with sound absorption by large flat absorbers, firstly the problem of homogeneous plane-parallel transversely isotropic layers is solved. Using matrix method the sound transfer function for an arbitrary position of the source and receiver in the layered media is derived. The derived analytical solution is used for the prediction of sound transmission losses and reflection factors of insulative walls, loss factors in statistical analysis method and sound transfer function of the outer ear canal. Using Raynoise system the process of modeling of noise in the interior of vehicle cab (car Skoda) is outlined and the estimation of adding of noise absorbing surface materials is discussed. The calculation and the assessment of traffic noise exposure are discussed for the projected bridge across the valley of the river Svratka. The calculation has to take into account screening and reflections on the valley-sides. The results of the experimental acoustic measurements and of the mathematical modeling in the hall of the Austerlitz monument are presented. The comparison of the mathematical modeling with the experiment demonstrates the presence of waves in the solid structure of the ceiling i.e. the presence of the waves of whispering gallery.

An absorption correction is proposed which can be applied retroactively to the response of a perfectly elastic medium, not decomposed into elementary waves. Using mathematical modeling by the ray method, the efficiency of cepstral filtering for inverse absorption problem is proved.