

MODEL LIDSKÉHO UCHA V PROSTŘEDÍ MATLAB

F. Rund

Katedra radioelektroniky, FEL ČVUT v Praze

Abstrakt

Pro studium kvalitativních aspektů zpracování zvukové informace v procesu slyšení je důležitá detailní znalost zpracování této informace, ke které dochází ve sluchové dráze. Majoritní podíl na tomto zpracování má vnitřní ucho a navazující sluchová centra v mozku, ovšem při skutečně detailním rozboru tohoto zpracování nemůžeme opomenout vliv středního a vnějšího ucha. Tento článek se zabývá sestavením modelu středního a vnějšího ucha v Matlabu se zvláštním zřetelem na modelování vnějšího zvukovodu lidského ucha.

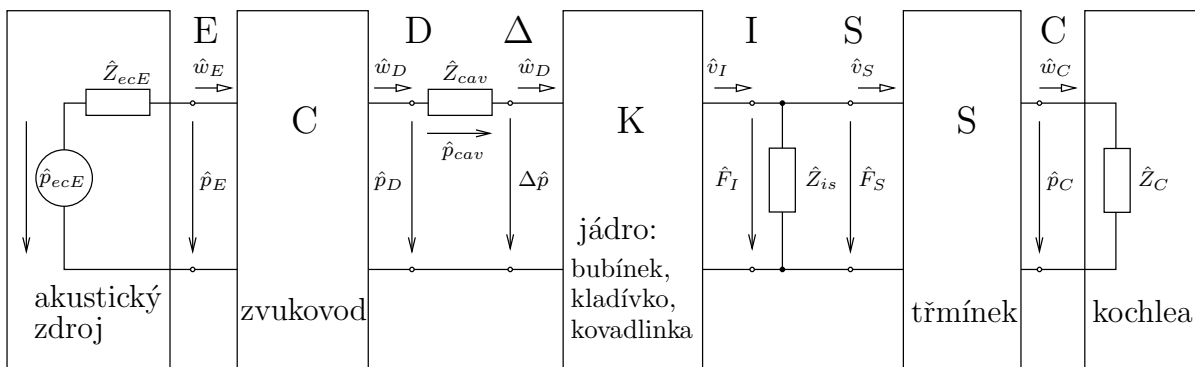
1 Úvod

Modely zpracování zvukového signálu v lidském uchu mají význam pro porozumění procesu lidského slyšení jako takového. Tento článek popisuje model vnějšího a středního ucha, realizovaný v prostředí MATLAB®, zaměřený na podrobné modelování individuálních tvaru vnějšího zvukovodu. Prezentovaný model je založen na metodě elektro-akustické analogie. Převážná část modelu byla převzata z práce [1], vnější zvukovod lidského ucha byl modelován pomocí několika sekcí vlnovodů různých typů, kterými byl aproximován individuální tvar zvukovodu získaný z odlitku konkrétního zvukovodu. Teoretický popis umožňující toto modelování byl publikován v práci [3].

Metoda elektro-akustické analogie využívá formální podobnosti základních rovnic elektrického pole s rovnicemi pole akustického. To umožňuje s výhodou užít propracovaný aparát teorie elektrických obvodů (např. náhradní obvody, maticový popis) i pro řešení akustických obvodů (podrobnosti viz např. [2]). Při modelování akustických vlnovodů se obvykle vychází z tzv. Websterovy vlnové rovnice (jednorozměrné), uvažující šíření rovinné vlny vlnovodem (viz např. [2]). Z této rovnice byl odvozen [3] popis vlnovodů proměnného průřezu ve formě kaskádní matice, vhodný pro implementaci do prostředí MATLAB®. Tento popis lze použít pro vlnovody, jejichž tvarovou funkci $r(x)$ lze aproximovat některou z funkcí $\sin \alpha x$, $\cos \alpha x$, $\cosh \alpha x$, $e^{\alpha x}$ nebo x^α . Implementaci tohoto popisu do prostředí MATLAB® je věnován samostatný příspěvek [4].

2 Model vnějšího a středního ucha

Model středního a vnějšího ucha (s výjimkou vnějšího zvukovodu) byl převzat z práce [1]. Tento model byl sestaven na základě velkého počtu měření na kadaverózních vzorcích. Model využívá



Obrázek 1: Celková struktura modelu podle [1]

elektro-akustickou analogii (struktura modelu viz obr. 1), proto bylo snadné převést popisy jeho jednotlivých bloků a prvků do formy kaskádních matic. Základní výhodou popisu ve formě kaskádních matic je, že celková kaskádní matice se získá součinem dílčích matic, tj.

$$\mathbf{A}_{all} = \prod_{i=1}^n \mathbf{A}_i. \quad (1)$$

Takto lze jednoduše pracovat s celým obvodem, modifikovat libovolné jeho části, případně zaměňovat popisy určitých částí (vnějšího zvukovodu).

Většina prvků modelu je frekvenčně závislých, frekvenčně závislá jsou tedy i příslušné kaskádní matice. Proto jsou tyto kaskádní matice implementovány jako matice velikosti $2 \times 2 \times n$, kde n je počet prvků použitého vektoru kmitočtů ($\mathbf{n}=\text{size}(\mathbf{f})$). Z tohoto důvodu nebylo možné matice násobit v MATLAB®u klasicky, ale bylo nutné implementovat funkci pro jejich násobení `nm(mat1,mat2,f)`. Tato funkce pro každý člen vektoru \mathbf{f} (kmitočet) provede vynásobení matic `mat1` a `mat2`.

Jednotlivé prvky modelu podle [1] byly převedeny na kaskádní matice pomocí vztahů známých z teorie elektrického pole. Např. matice impedance hlemýždě \hat{Z}_C , která zatěžuje střední ucho, byla implementována takto:

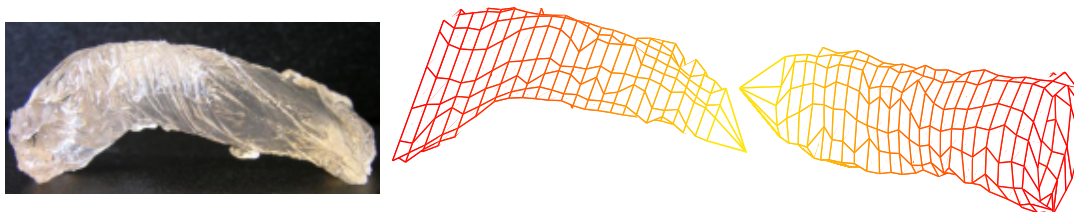
```
%cochlea matrix
mZc(1,1,:)=pom(:);
mZc(1,2,:)=0*pom(:);
mZc(2,1,:)=1./Zc(:);
mZc(2,2,:)=pom(:);
```

kde `mZc` je výsledná matice, `Zc` je impedance \hat{Z}_C a `pom` je pomocný jednotkový vektor délky n .

3 Model vnějšího zvukovodu

Vnější zvukovod byl modelován jako kaskáda vlnovodů proměnného průřezu. Jak bylo ukázáno v [5], pro vyloučení diskontinuit, které by měly za následek ovlivnění přenosových vlastností, je důležité dodržet spojitě a hladké (spojitě v první derivaci) napojení sousedních sekcí. Tuto podmínku lze do jisté míry dodržet pokud se omezíme na sinové, kosinové a katenoidní (cosh) vlnovody.

Model individuálního tvaru vnějšího zvukovodu byl sestaven na základě odlitku tohoto zvukovodu (obr. 2 vlevo). Geometrie tohoto odlitku byla stanovena pomocí trojsouřadnicového proměřovacího stroje. Pro upevnění vzorku při měření bylo nutno zabrousit jeho základnu do roviny. Měření bylo realizováno nasnímáním souřadnic (x, y, z) cca 8 bodů v řezech rovnoběžných se základnou (zbroušená ploška na odlitku) tak, aby byl každý řez co nejlépe popsán. Rozteč řezů byla 1 mm a počet bodů na řezu byl závislý na obvodové délce v každém řezu. Vzhledem ke konstrukci měřicího zařízení nebylo možné odečíst body ani příliš blízko vstupu do kanálu, ani v blízkosti jeho konce (bubínku). Měření bylo prováděno zvlášť pro přední a zadní poloprostor. Takto získaná data (ve formě měřicího protokolu) byla dále zpracována v prostředí MATLAB®.



Obrázek 2: Odlitek zvukovodu a jeho rekonstruovaný tvar.

Prvním krokem sestavení modelu v prostředí MATLAB[®] bylo načtení dat z měřicího protokolu. Data byla uložena ve sloupci pod sebou tak, že byla střídavě udávána x -, y -, a z -souřadnice. Proto bylo nutné získaný vektor rozdělit do vektorů odpovídajícím jednotlivým souřadnicím. Dále bylo nutné najít jednotlivé řezy, tj. souřadnice x a y odpovídající stejné souřadnici z . Tato operace nebyla triviální, neboť, jak bylo zmíněno, měření bylo prováděno pro přední a zadní poloprostor odděleně. Výsledkem těchto operací bylo vytvoření matic (pro každou souřadnici jedna) jejichž řádky odpovídaly vždy jednomu řezu (stejná souřadnice z). Vzhledem k tomu, že pro každý řez byl stanoven jiný počet bodů na obvodu, bylo nutné doplnit chybějící body tak, aby měl každý řádek stejně členů a řez byl uzavřen, tj. poslední bod řezu byl totožný s prvním. Bod ukončení zvukovodu, tj. místo, kde se stěny zvukovodu setkají, bylo určeno odhadem z celkové délky měřeného vzorku a doplněno do sítě naměřených dat tak, aby výsledek byl alespoň hrubě opticky shodný s tvarem vzorku (délka vzorku byla 26.2 mm, měřeno do $z = 23$ mm). Nakonec bylo provedeno „normování“ (převod na základní jednotky a posun počátku souřadnic) a kontrola a manuální korekce získaných dat. Získaná síť naměřených dat popisující tvar odlitku je na obrázku 2 uprostřed.

Dalším krokem bylo získání průřezové funkce $S(x)$ zvukovodu, tj. závislosti velikosti plochy jednotlivých řezů na vzdálenosti od referenčního bodu. Pro výpočet plochy pro každý řez byl použit vzorec pro výpočet plochy rovinného uzavřeného n -úhelníku zadaného souřadnicemi jeho vrcholů x_i a y_i podle [6]:

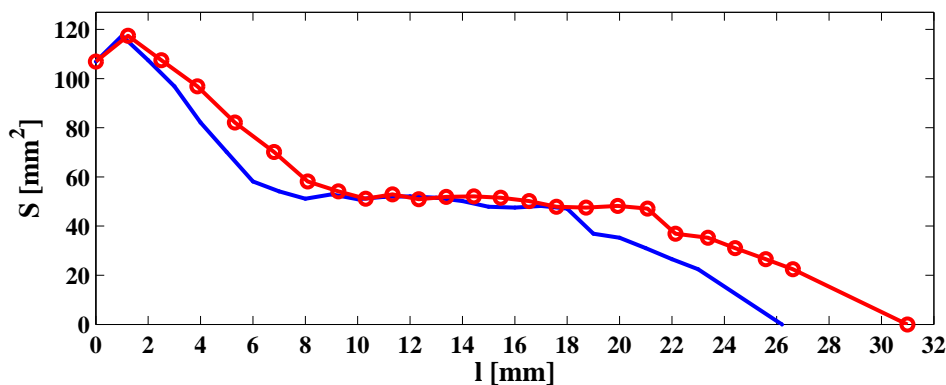
$$S = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i). \quad (2)$$

Takto získaná průřezová funkce je zobrazena na obr. 3 modře. Skutečná osa zvukovodu prochází středy jednotlivých řezů. Pro její určení jsme použili vzorec pro výpočet souřadnic těžiště rovinného n -úhelníka, opět podle [6]

$$c_x = \frac{1}{6S} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i + x_{i+1}) (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i),$$

$$c_y = \frac{1}{6S} \sum_{i=0}^{n-1} (y_i + y_{i+1}) (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i), \quad (3)$$

S je plocha podle (2), ostatní symboly a podmínky rovněž jako u vztahu (2). Takto vypočtená těžiště pro všechny řezy určují novou osu vlnovodu. Korektním postupem by bylo sestrojít v každém bodě normálovou rovinu k této ose (resp. k její tečně v tomto bodě) a určit body pláště zvukovodu, které v každé takovéto rovině leží. Tím by byly určeny nové řezy vlnovodu, kolmé na jeho novou osu. Dále by bylo nutné pro každý tento nový řez pootočít soustavu souřadnic a použitím vztahu (2) by se vypočetla nová průřezová funkce vlnovodu a z ní dalším použitím



Obrázek 3: Průřezová funkce odlitku podle osy měření (modře) a osy narovnaného odlitku (červeně)

zvukovodu je spojitá, ale není hladká v „inflexních“ bodech. Dále je měněna (manuálně) poloha příslušného „inflexního“ bodu a program dopočítává parametry odpovídajících tvarových funkcí tak, aby byla dodržena podmínka rovnosti prvních derivací sousedních sekcí s vhodnou tolerancí. Výstupem této procedury jsou parametry tvarových funkcí (viz tab. 1) jednotlivých sekcí, které mohou být použity jako vstupní parametry dalšího postupu. Popis výpočtu parametrů jednotlivých funkcí je předmětem příspěvku [4]

Popis vlnovodů podle [3], založený na *Websterově vlnové rovnici*, nepostihuje ztrátové jevy (vliv tlumení) ve zvukovodu. Tento vliv je možné zahrnout do modelu pomocí modifikování vlnového čísla k tak, že je přidána imaginární část popisující tlumení. Popis způsobů aproximace tlumení ve zvukovodu je nad rámec tohoto příspěvku, hrubý nástin viz [3]. Pokud tedy při výpočtu budeme uvažovat tlumení ve zvukovodu je potřeba načíst příslušné modifikované vlnové číslo.

Nyní je možné přikročit k vlastnímu modelování. Vzhledem k malým (viz obr. 4) příčným rozměrům zvukovodu lze použít jednodimenzionální přístup založený na *Websterově vlnové rovnici* publikovaný v [3]. Tento přístup využívá pro popis vlnovodu kaskádních matic. Implementaci kaskádní matice vlnovodu proměnného průřezu v prostředí MATLAB® je věnován zvláštní příspěvek [4]. Ve zmiňovaném příspěvku je popsána implementace funkcí, které sestaví kaskádní matici příslušného vlnovodu na základě parametrů jeho tvarové funkce (4). Pomocí těchto funkcí a parametrů z tabulky 1 tedy získáme kaskádní matice dílčích sekcí vnějšího zvukovodu lidského ucha.

4 Celkový model a jeho výsledky

Posledním krokem je sestavení celého modelu, tj. postupné násobení kaskádních matic jednotlivých sekcí i matic odpovídajících dalším částem ucha podle obr. 1. Na základě tohoto popisu můžeme vypočítat libovolné charakteristiky tohoto modelu, například přenos akustického tlaku zvukovodem, vstupní impedanci lidského ucha, celkový přenos do vnitřního ucha. . .

Pro výpočet zmíněných charakteristik bylo s výhodou využito vlastností kaskádní matice. Kromě již zmíněného vztahu pro výpočet matice soustavy (1) lze z definice kaskádní matice snadno odvodit vztah pro výpočet přenosu akustického tlaku obvodem s nekonečnou zatěžovací impedancí ($\hat{w}_2 = 0$)

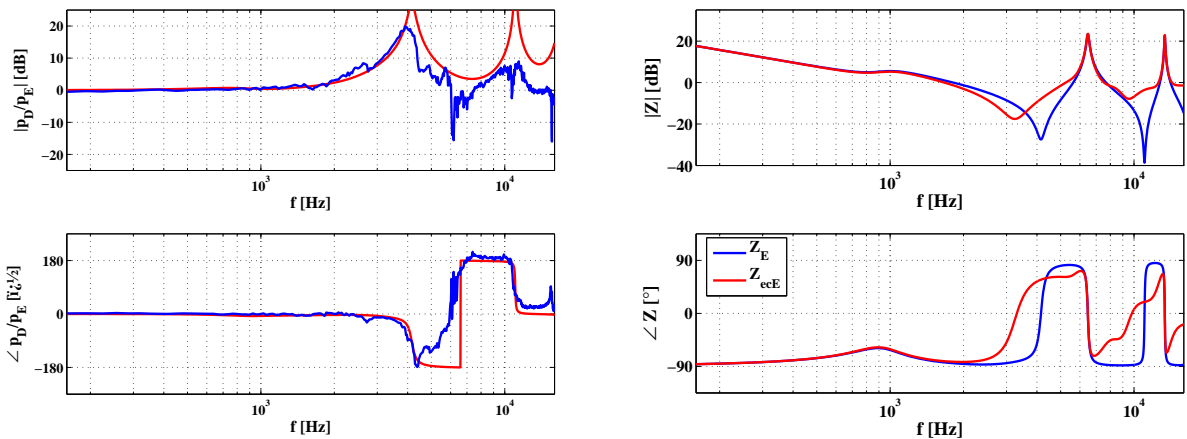
$$\left. \frac{\hat{p}_2}{\hat{p}_1} \right|_{\hat{w}_2=0} = \frac{1}{A_{11}}. \quad (5)$$

a výpočet vstupní impedance obvodu zatíženého nekonečnou impedancí

$$Z_{in} = \left. \frac{\hat{p}_1}{\hat{w}_1} \right|_{\hat{w}_2=0} = \frac{A_{11}}{A_{21}}. \quad (6)$$

Pro tyto účely byla v prostředí MATLAB® implementována funkce `prm(matice, k, prvni, druhy)`, která vybírá příslušný člen z kaskádní matice.

Pomocí postupného použití vztahů (1), (5) a (6) lze vypočítat téměř libovolné charakteristiky obvodu. Například pro výpočet přenosu akustického tlaku vnějším zvukovodem lidského ucha s uvažováním jeho zátěže středním a vnitřním uchem byly nejprve spočítány (1) kaskádní matice nezatíženého zvukovodu (od vstupu po výstup) a zatěžujících obvodů (od bubínku po hlemýžď). Dále byla vypočítána vstupní impedance zátěže (6) a tato impedance byla uvažována jako příčná impedance připojená na výstup zvukovodu (opět vztah (1)). Z takto vypočítané celkové matice byl stanoven přenos pomocí vztahu (5), tento přenos je znázorněn na obr. 5 vlevo. Pro srovnání je také zobrazen (modře) naměřený přenos zjištěný na kadaverózních vzorcích. Při tomto srovnání je zřejmé, že, při zanedbání vlivu tlumení ve zvukovodu, simulace uspokojivě odpovídá naměřenému průběhu.



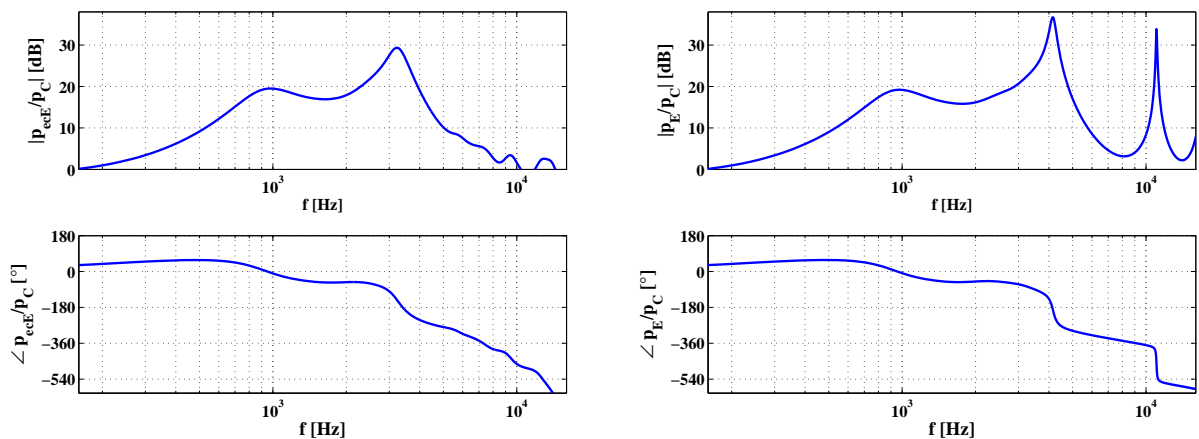
Obrázek 5: Modelovaný přenos vnějšího zvukovodu (vlevo – modře měřené, červeně model) a vstupní impedance zatíženého zvukovodu (vpravo – modře ze vstupu, červeně z volného pole)

Chceme-li vypočítat např. vstupní impedanci lidského ucha, postupujeme stejně, s tím rozdílem, že na celkovou matici aplikujeme vztah (6). Takto vypočítaná impedance je znázorněna na obr. 5 vpravo modrou čarou. Impedance znázorněná na tomto obrázku červenou čarou v sobě zahrnuje i impedanci ušního boltce, představuje tedy vstupní impedanci lidského ucha z volného pole.

Výše popsaným postupem lze spočítat i další impedance a přenosy. Pro studium zpracování akustické informace v procesu lidského slyšení je potřeba modelovat celkový přenos ze vstupu vnějšího zvukovodu (případně volného pole) do vnitřního ucha. Tyto přenosy jsou znázorněny na obr. 6.

5 Závěry

V tomto článku byla prezentována implementace modelu vnějšího a středního ucha v prostředí MATLAB[®]. Tento model využívá popisu akustické soustavy pomocí kaskádních matic [3], což umožňuje výpočet jeho rozmanitých charakteristik i začlenění tohoto modelu do celkového modelu procesu lidského slyšení. Rovněž tak při použití přesnějšího modelu některých částí není nutno měnit celý model, postačí nahradit pouze jednu příslušnou kaskádní matici. Byl popsán způsob získání základních charakteristik obvodu z kaskádní matice.



Obrázek 6: Modelovaný přenos do vnitřního ucha z volného pole (vlevo) a ze vstupu vnějšího zvukovodu (vpravo)

Prezentovaný model byl sestaven na základě individuálního tvaru konkrétního vnějšího zvukovodu lidského ucha zjištěného pomocí odlitku z kadaverózního vzorku. Článek podrobně popisuje implementaci jednotlivých kroků v prostředí MATLAB[®], od načtení geometrického tvaru odlitku až po výpočet přenosových charakteristik.

Modelovaný přenos vnějším zvukovodem byl porovnán s naměřeným a bylo dosaženo uspokojivé shody. Celkový modelovaný přenos z vnějšího prostředí do vnitřního ucha (obr. 6) má význam pro sestavení celkového modelu určeného ke studiu kvalitativních aspektů zpracování zvukové informace v procesu lidského slyšení.

Poděkování

Tato práce byla podporována grantem GA ČR č.102/05/2054 „Kvalitativní aspekty zpracování audiovizuální informace v multimediálních systémech“ a výzkumným záměrem VZ MSM6840770016.

Literatura

- [1] HUDDE, H. – ENGEL, A. Measuring and Modeling Basic Properties of the Human Middle Ear and Ear Canal. *ACUSTICA - acta acustica*, 1998, vol. 84, s. 720–738, 894–913, 1091–1109
- [2] ŠKVOR, Zd., Akustika a elektroakustika. Praha : Academia, 2001, pp. 527. ISBN 80-200-0464-0
- [3] RUND, F. Modeling of Acoustic Waveguides Using Electro-Acoustic Analogy: Application to the External Human Ear Canal. In *Proceedings of Inter-Noise 2004* [CD-ROM]. Prague: Czech Acoustic Society, 2004, s. 793. ISBN 80-01-03055-5.
- [4] RUND, F. Modeling of Acoustic Waveguides in Matlab. In *Proceedings of International Conference “Technical Computing Prague 2005”* [CD-ROM]. Prague: Humusoft, 2005.
- [5] RUND, F. Souvislost některých vlastností přenosové funkce vlnovodu nekonstantního průřezu a jeho geometrického tvaru. In *Audio Technologies and Processing ATP 2004*. Brno: VUT v Brně, FEKT, 2004. s. 15–23. ISBN 80-214-2643-8.
- [6] BOURKE, P. *Calculating the area and centroid of a polygon* [online]. July 1988. <<http://astronomy.swin.edu.au/~pbourke/geometry/polyarea/>>.

František Rund

Katedra radioelektroniky, FEL ČVUT Praha, Technická 2, 166 27, Praha 6
tel. 22435 2108, e-mail: xrund@feld.cvut.cz