

# SIMULACE ZVUKOVÉHO POLE VÍCE ZDROJŮ

*F. Rund*

Katedra radioelektroniky, Fakulta elektrotechnická,  
České vysoké učení technické v Praze

## Abstrakt

Studium zvukového pole vytvářeného soustavou jednotlivých zvukových zdrojů má význam pro mnoho aplikací v oblasti zvukové techniky. Tento článek popisuje realizaci jednoduché simulace 2D pole zdrojů zvuku v prostředí Matlab. Popisovaná simulace umožňuje simulovat realizaci „virtuálního zdroje“ (myšleného zdroje zvuku umístěného v konkrétní pozici) pomocí různých uspořádání 2D pole zdrojů zvuku. Navržená simulace je zamýšlena k využití pro ilustrační a demonstrační účely, pro rychlý odhad rozložení zvukového pole pro konkrétní rozložení reproduktorů, zejména při studiu systémů pro vícekanálový zvuk.

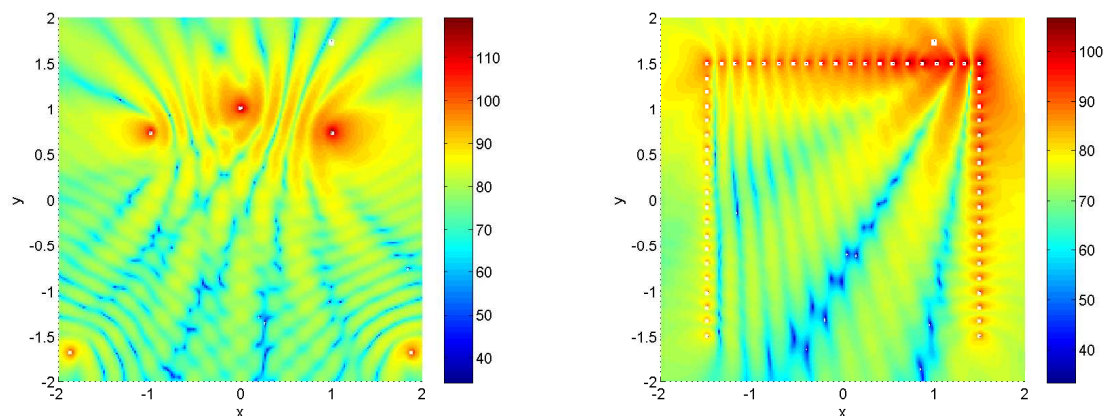
## 1 Úvod

Vytváření zvukového pole soustavou zdrojů není nikterak novou záležitostí (např. sloupové reproduktory = „akustické antény“). Ale až rozvoj prostředků pro digitální zpracování signálu přinesl možnost individuálního řízení signálu pro každý zdroj soustavy. Mezi zajímavé aplikace soustav zdrojů zvuku se řadí problematika „prostorového zvuku“, kdy je zvukové pole vytvářeno kombinací zvukových polí několika v prostoru rozmístěných reproduktorových soustav (např. systém 5.1 - obr. 1 vlevo).

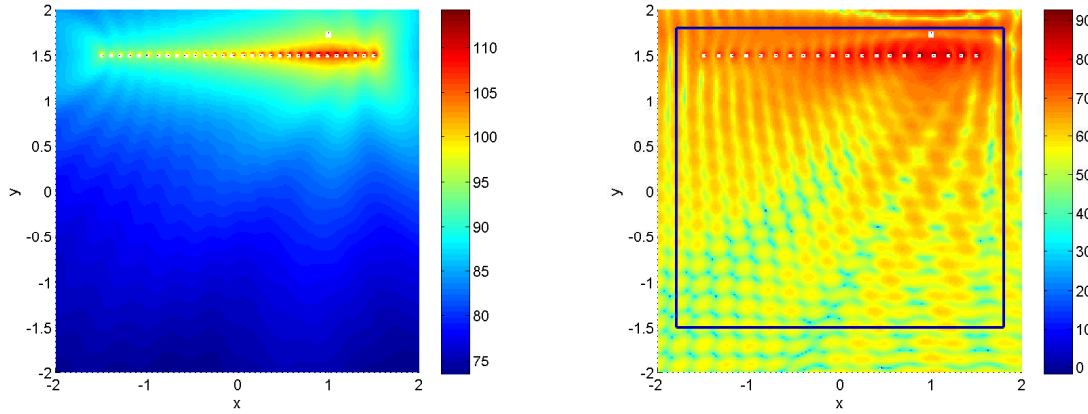
Méně známým způsobem vytváření „prostorového zvuku“ je metoda označovaná jako syntéza zvukového pole (Wavefield synthesis – WFS). V podstatě nejde o nic jiného, než o využití Huyghensova principu - každý bod vlnoplochy je zdrojem nového vlnění. To znamená, že virtuální zdroj můžeme vytvořit tak, že nahradíme stěnu místnosti polem reproduktorů (podobně jako můžeme nahradit okno televizní obrazovkou). Tato metoda předpokládá velký počet individuálně řízených reproduktorů – obr. 1 vpravo.

Podobného výsledku lze dosáhnout kombinací pole liniového zdroje (s individuálně říditelným signálem pro jednotlivé reproduktory - obr. 2 vlevo) a odrazů v místnosti, pomocí kterých je vytvářena iluze, že zvuk přichází i z boku a zezadu.

Další aplikací soustavy individuálně řízených zdrojů může být problematika zvukových



Obrázek 1: Simulace rozložení akustického pole generovaného virtuálním zdrojem – pomocí systému 5.1 (vlevo) a WFS (vpravo)



Obrázek 2: Simulace rozložení akustického pole generovaného virtuálním zdrojem pomocí liniové řady reproduktorů – vlevo bez a vpravo s uvažováním vlivu stěn místnosti.

zdrojů s řízenou směrovostí, kdy vhodným řízením signálu do jednotlivých měničů dochází k tvarování směrové charakteristiky soustavy zmíněných elektroakustických měničů (reproduktorů).

Pro studium zmíněných i dalších aplikací by bylo vhodné disponovat možností jednoduché simulace zvukového pole vytvářeného soustavou zvukových zdrojů. Popisem takovéto simulace v prostředí Matlab se zabývá tento článek.

## 2 Popis zvukového pole

Je obvyklé (viz např. [1]) při popisu zvukového pole používat veličinu nazývanou rychlostní potenciál  $\Phi$ . Z této veličiny lze akustický tlak vypočítat takto (platí pro harmonickou vlnu s kruhovým kmitočtem  $\omega$ , při respektování předpokladů definovaných v [1])

$$\mathbf{p} = -j\omega\rho_0\Phi, \quad (1)$$

kde  $\rho_0$  je hustota prostředí (vzduchu).

Studujeme-li zvukové pole vytvořené v nějakém bodě soustavou zdrojů v neohrazeném prostředí, potom výsledný rychlostní potenciál v tomto bodě je roven součtu potenciálů vyvolaných v tomto bodě jednotlivými zdroji. Tedy podle [1] můžeme napsat pro rychlostní potenciál v bodě  $A$

$$\Phi_A = \sum_{i=1}^n \Phi_i, \quad (2)$$

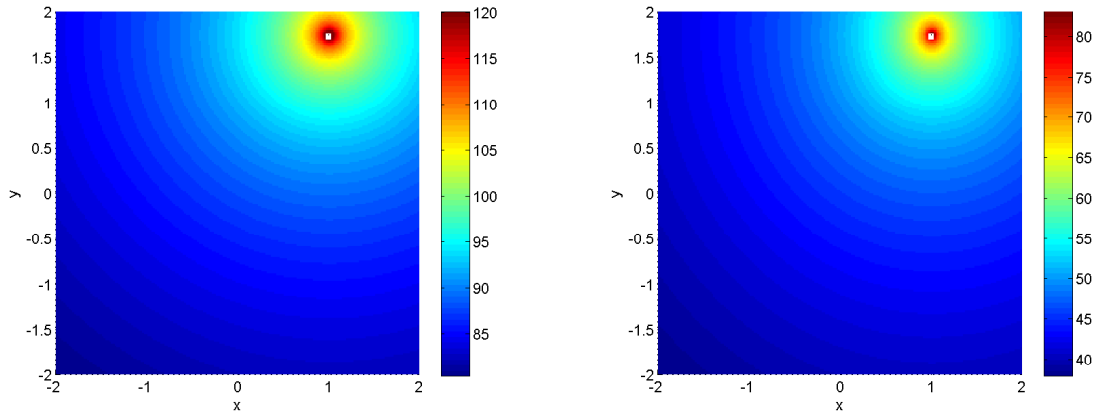
kde  $n$  je počet zdrojů.

Rychlostní potenciál od jednotlivých zdrojů závisí na charakteru těchto zdrojů. Pokud předpokládáme bodové zdroje (všesměrové zdroje, zdroje 0. řádu), můžeme podle [1] pro rychlostní potenciál od dílčího zdroje  $i$  ve vzdálenosti  $r_i$  od sledovaného místa  $A$  psát

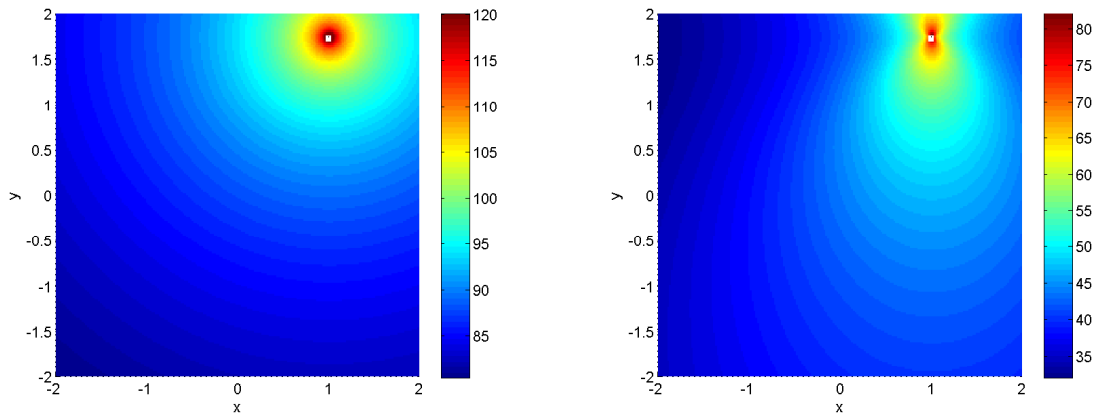
$$\Phi_i = \mathbf{A}_i \frac{e^{-jkr_i}}{r_i}, \quad (3)$$

kde  $k = \omega/c_0$  je vlnové číslo,  $\mathbf{A}_i$  je amplituda příslušného zdroje. Simulace rozložení zvukového pole bodového zdroje je na obr. 3 a 4 vlevo. Samozřejmě je možné uvažovat i jiné typy zdrojů, např. pro vzdálené pole kruhového pístové kmitajícího zářiče umístěného v nekonečně rozlehlé rovinné stěně platí podle [1]

$$\Phi_i = -\mathbf{A}_i \frac{e^{-jkr_i}}{r_i} \pi R_i^2 \frac{2J_1(kR_i \sin \vartheta_i)}{kR_i \sin \vartheta_i}, \quad (4)$$



Obrázek 3: Rozložení akustického pole při kmitočtu 1 kHz pro bodový zdroj (vlevo) a pro kruhový pístově kmitající zářič o  $R_i=5$  cm (vpravo)



Obrázek 4: Rozložení akustického pole při kmitočtu 3 kHz pro bodový zdroj (vlevo) a pro kruhový pístově kmitající zářič o  $R_i=5$  cm (vpravo)

kde  $R_i$  je poloměr kruhového zářiče,  $J_1(x)$  Besselova funkce prvního druhu, řádu 1 a  $\vartheta_i$  je úhel mezi kolmicí k rovině zářiče a místem poslechu  $A$ . Simulace rozložení zvukového pole tohoto zářiče je na obr. 3 a 4 vpravo.

Pokud je dílčím zdrojem reproduktor, záleží způsob aproximace jeho zvukového pole na aplikaci, rozměrech soustavy a použitém kmitočtovém pásmu. Jak je dále uvedeno v [1], pro nízké kmitočty, kdy platí  $kR < 1$  (tj. např. pro poloměr reproduktoru 5 cm jde o kmitočty nižší než 1 kHz), lze vztah (4) nahradit vztahem (3). Porovnání zvukových polí obou zářičů pro kmitočty 1 kHz a 3 kHz je na obr. 3 a 4.

Při simulaci virtuálního, tj. neexistujícího zdroje, který má být vytvořen pomocí pole reálných zvukových zdrojů, vyjdeme z Huyghensova principu - spočítáme rychlostní potenciál, který by byl vytvořen v místě reálného zdroje zdrojem virtuálním, a ten pak použijeme jako amplitudu  $A_i$  příslušného zdroje ve vztahu (3) popř. (4).

Zatím uvedený popis se týkal situace v neohrazeném prostoru. Vliv stěn (odrazů na stěnách) lze nejnadhěji simulovat metodou zrcadlení zdrojů. Tato metoda simuluje vliv stěny tím, že stěna je nahrazena zrcadlovým zdrojem, pohltivost stěny je simulována snížením amplitudy zdroje. Tímto způsobem byl získán obr. 2 vpravo.

### 3 Implementace v prostředí Matlab

Pokud postačuje uvedený jednoduchý popis, je jednoduchá i jeho implementace v prostředí Matlab. Výstupem má být obrázek znázorňující rozložení zvukového pole v prostoru, proto je nejdříve nutné definovat kartézské souřadnice  $x$  a  $y$  – čímž je definována část prostoru, ve které bude zkoumáno rozložení zvukového pole:

```
x=(xmin:krok:xmax);  
y=(ymin:krok:ymax);
```

Dále je v uvedeném prostoru nutno definovat souřadnice jednotlivých zvukových zdrojů (reproduktorů)  $lx$  a  $ly$ , např. pro liniový zdroj (obr. 2 vlevo):

```
lx=linspace(-1.5,1.5,20);  
ly=ones(size(ly))*1.5;
```

Pokud není vektor amplitud jednotlivých zvukových zdrojů pevně dán, získáme jej simulací virtuálního zvukového zdroje (myšlený zdroj o souřadnicích  $sx$  a  $sy$ ). Při jeho simulaci využijeme výše zmíněný Huyghensův princip, tj. vypočítáme amplitudy jednotlivých (reálných) zdrojů tak, aby odpovídaly poli, které virtuální zdroj vytvoří v místě reálného zdroje. Např. pro případ bodového virtuálního zdroje to znamená nejdříve vypočítat vzdálenost reálného a virtuálního zdroje  $rr$  a potom použít vztah (3).

```
rr=sqrt((lx-sx(ii)).^2 + (ly-sy(ii)).^2);%vzdálenost od virt. zdroje  
A1=L(ii)*exp(-j*k*rr)./rr;           %Amplituda jedn. menicu  
%A1=L(ii)./rr;                       %Amplituda jedn. menicu bez faze
```

Jak je uvedeno v komentáři, lze při simulaci rozlišit, zda uvažujeme či neuvažujeme fázovou složku signálu. Fázová složka se neuvažuje např. při amplitudovém panorámování, které se často ve vícekanálovém zvuku využívá. Pokud je virtuálních zdrojů více, sečteme podle (2) jejich příspěvky v místě reálného zdroje a výsledek použijeme jako amplitudu reálného zdroje, jak bylo výše zmíněno.

Pokud simulujeme zvukové pole s uvažováním ohraničení prostoru, provedeme ozrcadlení zdrojů, např. takto

```
stenahx1=-1.5;           %stena  
stenahlalf=0.5;         %cinitel odrazu  
shlly=ly;               %zustava  
shllx=(stenahx1-lx)+stenahx1; %zrcadleni  
Ash1=stenahlalf*(A);    %amplituda
```

Po vytvoření všech zrcadlových zdrojů doplníme o tyto zdroje vektory  $lx$ ,  $ly$  a  $A$ . V příkladu na obr. 2 vpravo byly uvažovány jen zrcadlové zdroje prvního řádu, tedy nikoli odrazy odrazů.

Po provedení právě naznačených kroků tedy vektory  $lx$ ,  $ly$  a vektor amplitud  $A$  určují pole zdrojů. Pro každý bod ve zkoumaném prostoru nyní vypočítáme rychlostní potenciál od všech zdrojů – vztah (2)

```
for jj=1:length(x)  
for ii=1:length(ly)  
r=sqrt((x(jj)-lx(ii))^2 + (y-ly(ii)).^2);  
Phi=(A(ii)*exp(-j*k*r)./r); %bodovy zdroj  
Phi(jj,:)=Phi(jj,:)+Phi;  
end  
end
```

V případě uvažování jiného charakteru zdroje než bodového upravíme vztah pro výpočet vektorového potenciálu od dílčího zdroje  $\Phi_i$  např. podle (4).

Po získání matice rozložení rychlostního potenciálu následuje přepočítání na akustický tlak podle vztahu (1), a dále na hladiny akustického tlaku (dB SPL) a jejich výsledné zobrazení (příkaz `surf`).

## 4 Závěr

Popsaná simulace umožňuje jednoduchým způsobem znázornit rozložení zvukového pole od zvukových zdrojů umístěných v prostoru. V ukázkách byly simulovány převážně případy bodových zdrojů, ale popsáný způsob umožňuje simulaci pole libovolných zdrojů, u kterých je známý vztah pro jejich rychlostní potenciál. Vliv ohraničení prostoru je možno zahrnout pomocí metody zrcadlení zdrojů. Využití popsané simulace se předpokládá zejména pro studium a odhad zvukového pole různých konfigurací reproduktorů v systémech pro vícekanálový zvuk. Dále je možné využití pro demonstrační a výukové účely.

## Poděkování

Tento příspěvek byl podpořen z výzkumného záměru MSM 6840770014 „Výzkum perspektivních informačních a komunikačních technologií“ MŠMT ČR.

## Reference

- [1] ŠKVOR, Zdeněk, Akustika a elektroakustika. Praha : Academia, 2001, pp. 527. ISBN 80-200-0464-0