



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra radioelektroniky**

Syntéza směrového zvukového pole v poslechové místnosti

Directional Field Synthesis in the Listening Room

Diplomová práce

Studijní program: Komunikace, Multimédia a Elektronika

Studijní obor: Multimediální technika

Autor: Bc. Michal Voldán

Vedoucí práce: Dr. Ing. Libor Husník

Praha 2014

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 12. 5. 2014

Bc. Michal Voldán

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych touto cestou poděkovat všem, kteří mi pomáhali s touto diplomovou prací.

Děkuji panu Dr. Ing. Liboru Husníkovi za jeho cenné rady a připomínky, díky kterým mě při realizaci práce vedl správným směrem a za jeho odborný dohled nad průběhem celé práce.

Dále bych chtěl poděkovat katedře radioelektroniky za poskytnutí laboratorních prostor, poskytujících dostatečný výpočetní výkon pro urychlení vývoje práce.

Děkuji také svým přátelům a rodině za jejich trpělivost a pasivní podporu, kterou mi věnovali po celý čas studia oboru Multimediální technika.

Abstrakt:

Předložená práce dokumentuje vývoj programu v prostředí MATLAB, za účelem výpočtu, zobrazení a následné replikace zvukového pole v poslechovém prostoru 3x3 metry. Toto pole lze vybudit libovolným počtem reproduktorů v libovolných polohách. Výsledné rozložení hladiny akustického tlaku je pak závislé na počtu a rozmístění těchto zdrojů. Uprostřed místnosti s ideálně pohltivými stěnami se nachází tuhá sféra o poloměru 8 cm, která modeluje lidskou hlavu. Dalším parametrem, ovlivňujícím celkové pole, je tedy násobek poloměru tuhé koule a vlnového čísla, tzv. „ka“. V závislosti na tomto parametru se pak do celkového rozložení v různé míře promítá geometrie dané sféry. Pro následnou replikaci lze pak opět použít volitelný počet reproduktorů s libovolným rozmístěním. Volba polohy a množství zdrojů bude mít následně vliv na rozdíl mezi původním a replikovaným polem.

V teoretické části této práce jsou obsaženy veškeré rovnice a předpoklady, ze kterých všechny vytvořené programy vychází. Teoretická část je určena pro čtenáře, kteří jsou již seznámeni se základy akustiky a má za úkol především připomenout fyzikální zákony, využitě v této práci.

V praktické části jsou uvedeny zásadní pasáže každého jednotlivého podprogramu s výslednými výstupními obrázky. Každý program je doplněn o vlastní grafické rozhraní, které sjednocuje všechny potřebné podprogramy do jednoho uživatelsky pohodlnějšího, hlavního programu.

Hlavní programy pak nabízí možnost kombinování zdrojů o libovolných souřadnicích a volitelném parametru „ka“, replikaci výsledného zvukového pole libovolnou kombinací zdrojů a určení bodů v prostoru, ve kterých musí dojít ke stoprocentní replikaci. Nechybí ani možnost vykreslení tzv. „chybového pole“, směrové charakteristiky pro daný parametr „ka“, nebo výpočet a vykreslení frekvenční odezvy pro obě „uši“. Každou charakteristiku lze uložit pod vlastním názvem. Pro každé vytvořené pole se navíc automaticky ukládá matice hodnot akustického tlaku ve formě tzv. „mat“ souboru. Program vykresluje plošné charakteristiky s maximálním rozlišením $\pm 0,5$ mm.

Klíčová slova: zvuk, syntéza zvukového pole, akustický tlak, kulová vlna, sférické souřadnice

Abstract:

The present work documents the development of the program in the MATLAB environment, for the purpose of calculating, displaying and subsequent replication of the sound field in the listening space of 3x3 meters. It can be excited by arbitrary number of loud-speakers at arbitrary positions. The resulting distribution of the sound pressure level is then dependent on the number and placement of these sources. In the middle of the room, with ideally absorbing walls, is located a solid sphere with a radius of 8 cm, which models a human head. Another factor, influencing the total field, is then the multiple of the radius of the rigid sphere and wavenumber, so-called „ka“. Depending on this parameter, the geometry of the sphere is then reflected to the total distribution, in varying degrees. For subsequent replication, the optional number of sources with arbitrary locations can be then selected. Selection of positions and the quantity will then affect the difference between the original and replicated field.

In the theoretical part of this thesis are included all the equations and assumptions, on which all created programs are based. The theoretical part is intended for readers who are already familiar with the basics of acoustics and is tasked mainly to recall the physical rules that are used for this project.

In the practical part, there are listed essential parts of each subroutine with resulting output images. Each program is supplemented by a proper graphical interface that unifies all the necessary subroutines into one, user more comfortable, main program.

Main programs then offer the possibility of combining sources of arbitrary coordinates and the arbitrary parameter „ka“, replication of the resulting sound field by an optional sources combination and determining points in space, in which there must be a hundred percent replication. There is also the possibility of rendering so called “error field”, directional characteristics for the given parameter, or the calculation and the plotting of the frequency response for both „ears“. Each characteristic can be saved with the arbitrary name. In addition, for each created field, the matrix of values of the sound pressure is automatically saved in the form of a „mat“ file. The program renders the surface characteristics with a maximum resolution of $\pm 0,5$ mm.

Keywords: sound, acoustic field synthesis, sound pressure, spherical wave, spherical coordinates

OBSAH

1	ÚVOD	1
2	POUŽITÉ METODY	2
3	TEORETICKÁ ČÁST	3
3.1	ZVUK	3
3.2	VLASTNOSTI ZVUKU	3
3.2.1	<i>Hladina akustického tlaku</i>	3
3.2.2	<i>Rychlost šíření zvuku</i>	3
3.3	HUYGENSŮV PRINCIP	4
3.4	PEVNÁ PŘEKÁŽKA VE ZVUKOVÉM POLI	4
3.4.1	<i>Odraz vlny</i>	4
3.4.2	<i>Difrakce</i>	5
3.5	PARAMETRY PROSTŘEDÍ	6
3.6	SFÉRICKÁ SOUSTAVA SOUŘADNIC	7
3.7	VLNOVÁ ROVNICE	8
3.7.1	<i>Rychlostní potenciál</i>	8
3.7.2	<i>Obecná vlnová rovnice</i>	8
3.7.3	<i>Sférická vlna</i>	9
3.7.4	<i>Vlna přímá ve sférických souřadnicích</i>	10
3.7.5	<i>Vlna rozptýlená ve sférických souřadnicích</i>	11
4	PRAKTICKÁ ČÁST	12
4.1	SMĚROVÉ CHARAKTERISTIKY	12
4.1.1	<i>Výsledky</i>	12
4.1.2	<i>Grafické rozhraní</i>	14
4.2	FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKY	15
4.2.1	<i>Výsledky</i>	15
4.2.2	<i>Grafické rozhraní</i>	17
4.3	PLOŠNÉ CHARAKTERISTIKY	18
4.3.1	<i>Výsledky</i>	18
4.3.2	<i>Grafické rozhraní</i>	20
4.3.3	<i>Dolby 5.1</i>	21
4.3.4	<i>Zmenšení oblasti vykreslování</i>	23
4.4	SYNTÉZA POLE	24
4.4.1	<i>Implementace</i>	25
4.5	RELATIVNÍ CHYBA REPLIKACE	31
4.5.1	<i>Závislost kvality replikace na parametru ka</i>	32
4.5.2	<i>Závislost kvality replikace na vzdálenosti skupiny od sféry</i>	35
4.5.3	<i>Závislost kvality replikace na vzdálenosti skupiny od originálního zdroje</i>	38
4.5.4	<i>Závislost kvality replikace na vzdálenosti mezi replikanty</i>	41
4.5.5	<i>Závislost kvality replikace na počtu replikantů</i>	44
4.5.6	<i>Závislost kvality replikace na počtu bodů zájmu</i>	48
5	ZÁVĚR	52
6	ZDROJE	53
6.1	LITERATURA	53
6.2	OSTATNÍ ZDROJE	53
6.3	POUŽITÝ SOFTWARE	54
6.4	OBSAH PŘILOŽENÉHO CD	54

1 ÚVOD

V současné době je v oboru akustiky znatelným trendem snaha o prostorovou reprezentaci zvuku při co nejefektivnějším rozmístění reproduktorů. Cílem této práce je proto napsat program v prostředí MATLAB, který na základě teoretických předpokladů spočítá a následně zobrazí rozložení zvukového pole, vybuzeného libovolným počtem reproduktorů v libovolných polohách, v poslechové oblasti 3x3 metry. Toto pole je následně možné v předem určených bodech prostoru replikovat a to opět volitelným počtem zdrojů s nastavitelnými polohami. Aby to bylo možné, je nutno nalézt vhodné koeficienty, násobící vstupní signál každého jednotlivého zdroje. Pro zjištění míry přesnosti replikace se dále vykreslí tzv. „chybové pole“, kvantifikující rozdíl pole originálního a replikovaného.

Kvalita replikace se bude lišit v závislosti na počtu a rozmístění replikujících zdrojů a na zvolené hodnotě parametru ka . Vlastnosti zvukového pole jsou totiž ovlivněny prostředím, ve kterém toto pole vzniká. Obvykle se nejedná pouze o fyzikální vlastnosti prostoru, ve kterém se zvukové vlny šíří, ale také o geometrické parametry všech objektů, které se v dané oblasti nacházejí. Důležitou roli hrají také materiálové vlastnosti, jako např. zvuková pohltivost. Mezi nejdůležitější jevy, které se podílí na výsledném rozložení zvukového pole, patří ohybové jevy jako difrakce a odraz vlny. S těmito jevy je nezbytné počítat, protože v jejich důsledku se celkové pole skládá z vln přímých, odražených a difrakovaných. Z tohoto důvodu je nezbytné respektovat skutečnost, že přítomnost posluchače ve vybuzeném prostoru může ovlivnit, nebo dokonce výrazně deformovat původní pole, a to zejména na vysokých frekvencích. Už jen z násobku vlnového čísla a poloměru lidské hlavy lze předběžně odhadnout, do jaké míry k této deformaci dojde.

Toto téma jsem si vybral, protože oblast zvukové techniky má velký potenciál, ať už pro možnosti velmi přesného prostorového vnímání zvuku, v oblasti asistivních technologií, nebo pro účely aktivní ochrany proti hluku. Věřím, že se tyto disciplíny budou i nadále rozvíjet a zvuk časem přebere roli hlavního ovládacího prvku většiny zařízení.

Tato práce byla mimo jiné vytvořena pro účel navigace nevidomých osob v rámci grantového projektu SGS13/193/OHK3/3T/13 „Metody monitorování a modelování v akustice“.

2 POUŽITÉ METODY

Pro účely výpočtů, použitých v následujících programech, bylo využito několik fyzikálních zákonů a vlastností zvukových vln, které jsou popsány v teoretické části této práce. Tato část také obsahuje několik základních definic, nezbytných pro správné pochopení vlastností zvuku. Metody výpočtu využívají hlavně Huygensův princip, ohyb a odraz vlny od tuhé překážky. S ohledem na tyto vlnové jevy je třeba předpokládat, že tvar a rozložení zvukového pole bude velmi záviset na frekvenci zvuku. Tato závislost je nejprve ověřena výpočtem směrových charakteristik a průběhu frekvenční charakteristiky v oblastech reprezentujících polohu uší.

Dalším krokem je pak výpočet plošných charakteristik, které jsou již do značné míry závislé na zvolených polohách a počtech zdrojů. Tyto charakteristiky ukazují rozložení hladiny akustického tlaku v poslechovém prostoru.

V posledním kroku je realizován program, který umožňuje replikovat pole v definovatelných bodech libovolnými zdroji a vykreslit tzv. „chybové zvukové pole“ v daném prostoru.

Každý jednotlivý program je doplněn o grafické rozhraní s možnostmi výběru všech zásadních parametrů výpočtu, vykreslení a uložení všech potřebných charakteristik pod libovolným názvem a nechybí ani možnost vzájemných kombinací plošných charakteristik. Všechny programy uvedené v této práci jsou k dispozici na přiloženém CD.

3 TEORETICKÁ ČÁST

3.1 Zvuk

Z fyzikálního pohledu je zvuk definován jako mechanické kmitání částic pevné, kapalné, nebo plynné látky. Pro člověka je zvuk slyšitelným, pokud jeho frekvence leží v tzv. "audio-frekvenčním pásmu", které odpovídá kmitočtovému rozsahu přibližně od 15 Hz do 20 kHz. Zvuk o frekvencích nižších, než uvedený rozsah se nazývá "infrazvuk" a zvuk o vyšších kmitočtech než horní hranice pásma je nazýván "ultrazvuk". Zvuková vlna je pak definována jako podélné vlnění, které se šíří v prostředí, v audio-frekvenčním pásmu. [1]

3.2 Vlastnosti zvuku

3.2.1 Hladina akustického tlaku

Šíření zvukových vln způsobuje střídavé narůstání a pokles hustoty prostředí, což má za následek změny „akustického tlaku“. Akustický tlak je dán jako rozdíl celkového a barometrického tlaku.

S ohledem na logaritmické vnímání hlasitosti lidským uchem je pak definována „hladina akustického tlaku“ jako:

$$SPL = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{p_a}{p_{ref}} \right) [dB], \quad (1)$$

kde p_a je akustický tlak v Pa a $p_{ref} = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa je referenční akustický tlak, přibližně odpovídající prahu slyšitelnosti v okolí 1 kHz. [1]

3.2.2 Rychlost šíření zvuku

Je to rychlost, kterou se vlna šíří prostředím. Tato rychlost závisí hlavně na teplotě a barometrickém tlaku prostředí. Ve vzduchu přibližně platí, že:

$$c_0 = 331,8 + 0,61 \cdot T [m \cdot s^{-1}], \quad (2)$$

kde T je teplota ve stupních Celsia. [1]

3.3 Huygensův princip

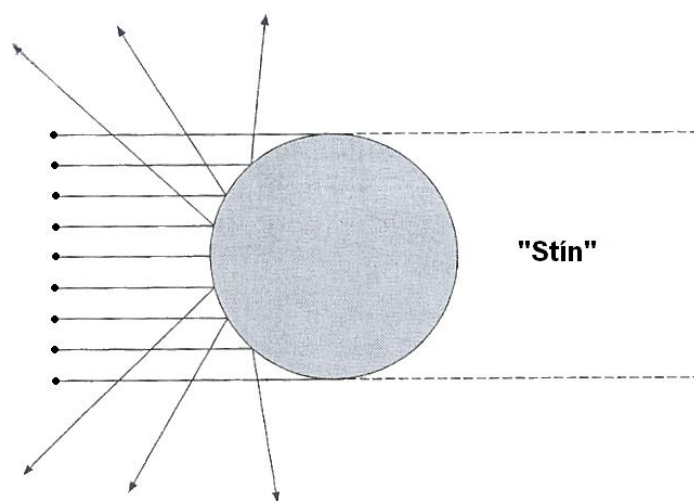
Podle Huygensova principu lze kterýkoliv bod na vlnoploše považovat za elementární zdroj kulové vlny. To znamená, že i rovinná vlna je zdrojem menších kulových vln. Rovinná vlna se v prostoru šíří vždy celá jedním směrem jako rovina, ale vzniklé kulové vlny se pak šíří z těchto jednotlivých bodových zdrojů s kulovými vlnoplochami. [1,3]

3.4 Pevná překážka ve zvukovém poli

Lidská hlava může být modelována jako pevná překážka ve zvukovém poli, které bude obzvláště na vyšších frekvencích její přítomností deformováno. Tato kapitola má za úkol přiblížit, za jakých podmínek a jakým způsobem bude pole překážkou ovlivněno.

3.4.1 Odraz vlny

Podle [3], způsobí překážka v homogenním rovinném zvukovém poli zvýšení p_a na straně, ze které vlna postupuje a snížení p_a na straně opačné (v tzv. „akustickém stínu“), přibližně tehdy, když je vlnová délka λ menší, než poloměr překážky R . Tento jev se nazývá „odraz vlny“. Zvukové vlny se tedy odráží od povrchu překážky a rozptylují svou energii zpět do prostoru. [3]



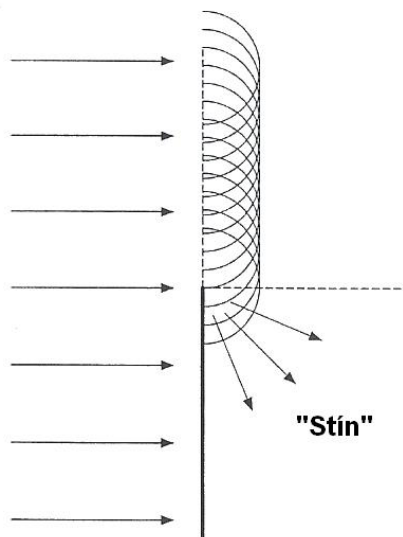
Obr. 3.1: Odraz vlny [3]

3.4.2 Difrakce

V okamžiku, kdy je λ dopadající vlny srovnatelná s poloměrem překážky R , se překážka stává zdrojem tzv. „sekundárních vln“, které se začnou překrývat s původním zvukovým polem a více, či méně jej deformují.

Část vlny se tak dostane do oblasti geometrického stínu, kde se tzv. „rozmlží“.

S narůstající hodnotou λ pak může stín vymizet zcela. Tento jev se nazývá „difrakce“, tedy ohyb vlny okolo překážky. Difrakce je výraznější čím menší je překážka a čím vyšší je hodnota λ . V podstatě se jedná o důsledek Huygensova principu. [3]



Obr. 3.2: Difrakce na hraně tenké stěny [3]

Sekundární vlny se v případě rovinné vlny v ostatních směrech, než je směr šíření, navzájem vruší. Na obrázku 3.2 je patrné, že se vlna nejbližší okraji překážky již s žádnou další nevyruší, takže vlna vnikne do oblasti geometrického stínu.

Pro větší hodnoty λ tak nastane ohyb vlny okolo překážky a pole není překážkou prakticky ovlivněno. [3]

3.5 Parametry prostředí

Předpokládáme, že prostředí, ve kterém bude modelováno šíření zvuku, je vzduch. Rychlost šíření zvuku je zvolena jako $c_0 = 343 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a střední hustota vzduchu je $\rho_0 = 1,21 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Charakteristická impedance vzduchu je pak $Z_0 = \rho_0 \cdot c_0 = 415,03 \text{ Raylů}$ a vlnové číslo je při úhlovém kmitočtu $\omega = 2\pi f$ dáno, jako $k = \frac{\omega}{c_0}$. [2]

3.6 Sférická soustava souřadnic

Na základě Huygensova principu lze všechny vlny v dostatečné vzdálenosti od zdroje předpokládat za sférické, proto budou všechny výpočty prováděny ve sférické soustavě souřadnic. Konverze mezi kartézskou a sférickou soustavou je dána dle obr. 3.3 jako:

$$x = r \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi, \quad (3)$$

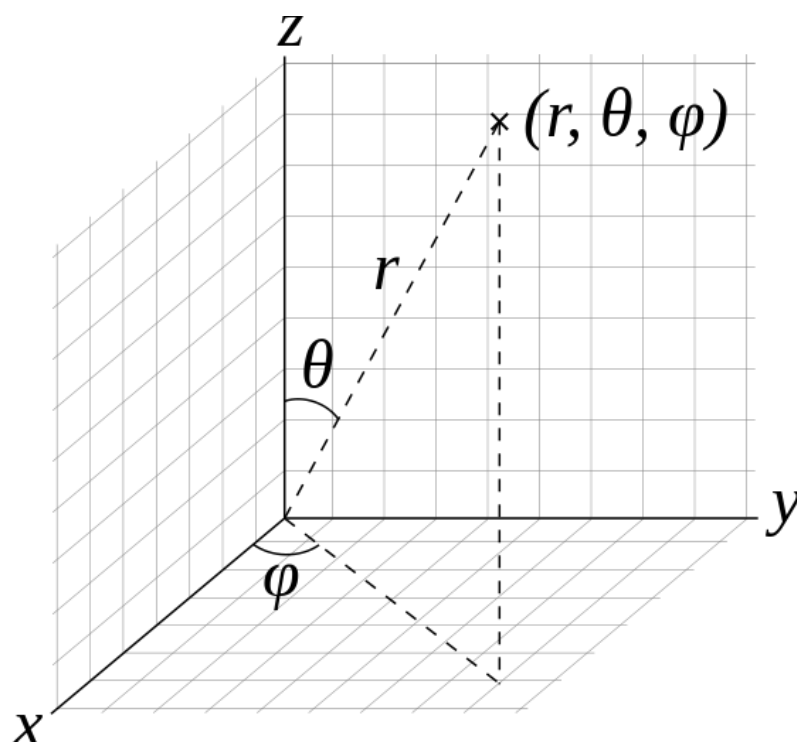
$$y = r \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi, \quad (4)$$

$$z = r \cdot \cos \theta, \quad (5)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \quad (6)$$

$$\varphi = \operatorname{atan2}\left(\frac{y}{x}\right), \quad (7)$$

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{z}{r}\right). \quad (8)$$



Obr. 3.3: Sférická soustava souřadnic: vzdálenost od počátku r , elevační úhel θ a azimutální úhel φ [7]

[3,4]

3.7 Vlnová rovnice

V následující části jsou uvedeny vlnové rovnice pro kulovou vlnu v kartézských a sférických souřadnicích.

3.7.1 Rychlostní potenciál

Pro tuto skalární veličinu, využívanou zejména pro zvýšení přehlednosti dalších výpočtů, platí:

$$v = \text{grad}(\Phi) [m \cdot s^{-1}; m^2 \cdot s^{-1}], \quad (9)$$

kde v je akustická rychlost. [1]

3.7.2 Obecná vlnová rovnice

Obecná vlnová rovnice je, podle [1], odvozena z druhého Newtonova zákona, rovnice kontinuity a stavové rovnice, jako:

$$\Delta\Phi = \frac{1}{c_0} \cdot \frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2}, \quad (10)$$

kde t značí čas. Pro harmonicky proměnné Φ s amplitudou ψ , kde:

$$\Phi = \psi \cdot e^{j\omega t} \quad (11)$$

a

$$\Delta\psi + k^2\psi = 0, \quad (12)$$

platí:

$$\frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2} = -\omega^2\psi \cdot e^{j\omega t} = -\omega^2\Phi. \quad (13)$$

[1]

3.7.3 Sférická vlna

Pro harmonicky proměnné veličiny má vlnová rovnice sférické vlny tento tvar:

$$\Phi_r = \frac{A_1}{r} \cdot e^{j(\omega t - kr)} + \frac{A_2}{r} \cdot e^{j(\omega t + kr)}, \quad (14)$$

kde r je poloměr vlny (vzdálenost vlnoplochy od zdroje) v čase t . Část s amplitudou A_1 je část šířící se od zdroje ve směru $+r$ a část s amplitudou A_2 je část odražená, šířící se ve směru $-r$.

Protože:

$$p_a = -\rho \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial t}, \quad (15)$$

kde p_a je akustický tlak způsobený vlnou dopadající od zdroje, pro kartézské souřadnice platí, že:

$$p_a = -j\omega\rho \cdot \frac{A_1}{r} \cdot e^{j(\omega t - kr)}, \quad (16)$$

A pro sférické souřadnice platí, že:

$$p_a = -j\omega\rho \cdot \frac{A_1}{4\pi r} \cdot e^{j(\omega t - kr)}. \quad (17)$$

[1]

3.7.4 Vlna přímá ve sférických souřadnicích

Pokud definujeme tzv. “sílu zdroje” jako:

$$\tilde{\omega} = jkZ_0q, \quad (18)$$

kde q je tzv. „amplituda“ (dále jen „koeficient“), pak akustický tlak p_{inc} v libovolném bodě prostoru $\mathbf{r}_0(r_0; \Phi_0; \varphi_0)$ způsobený zdrojem kulové vlny v místě $\mathbf{r}_s(r_s; \Phi_s; \varphi_s)$ může být spočítán, jako:

$$p_{inc}(\mathbf{r}_0) = -\tilde{\omega} \cdot G_\infty(\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_s). \quad (19)$$

$G_\infty = \frac{e^{jkr}}{4\pi r}$ je Greenova funkce ve volném prostoru a $\vec{r} = \begin{Bmatrix} x_0 - x_s \\ y_0 - y_s \\ z_0 - z_s \end{Bmatrix}$; $r = \|\vec{r}\|$.

Kulová vlna dopadá na tuhou kouli umístěnou v počátku souřadného systému. [2]

3.7.5 Vlna rozptýlená ve sférických souřadnicích

K vyřešení problematiky rozptylu lze rozložit Greenovu funkci ve volném prostoru do sférických harmonických funkcí:

$$G_{\infty} = \frac{jk}{2\pi} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{+l} \varepsilon_m \cdot \cos[m \cdot (\varphi - \varphi_s)] \cdot p_l^m(\cos \Phi_s) \cdot p_l^m(\cos \Phi) \cdot j_l(kr_{<}) \cdot h_l(kr_{>}), \quad (20)$$

kde j_l je sférická Besselova funkce, h_l je sférická Hankelova funkce prvního řádu, p_l^m je normalizovaná přidružená Legendreova funkce prvního řádu,

$$j = \sqrt{-1}, \quad (21)$$

$$r_{<} = \min(r, r_s), \quad (22)$$

$$r_{>} = \max(r, r_s), \quad (23)$$

a

$$\varepsilon_m = \begin{cases} 1, & m = 0 \\ 2, & m \neq 0 \end{cases}. \quad (24)$$

Předpokládáme, že $p_{scat}(r_0)$ je akustický tlak způsobený vlnou, rozptýlenou o tuhou kouli o poloměru a a funkce $p_{scat}(r_0)$ splňuje Helmholtzovu vlnovou rovnici ($\nabla^2 A + k^2 A = 0$) a Sommerfeldovu vyzářovací podmínku. Pak

$$\frac{\partial p_{inc}}{\partial r} + \frac{\partial p_{scat}}{\partial r} = 0, \text{ v místě } r = a. \quad (25)$$

Zdroj je vždy umístěn vně tuhé koule ($r_s > a$). Rozptýlená vlna v libovolném bodě $\mathbf{r}(r; \Phi; \varphi)$ pak může být zapsána, jako:

$$p_{scat} = \tilde{\omega} \cdot \frac{jk}{2\pi} \cdot \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{+l} \varepsilon_m \cdot \left[\frac{l \cdot j_{l-1}(ka) - (l+1) \cdot j_{l+1}(ka)}{l \cdot h_{l-1}(ka) - (l+1) \cdot h_{l+1}(ka)} \right] \cdot \cos(m \cdot (\varphi - \varphi_s)) \cdot p_l^m(\cos \Phi_s) \cdot p_l^m(\cos \Phi) \cdot h_l(kr_s) \cdot h_l(kr). \quad (26)$$

[2]

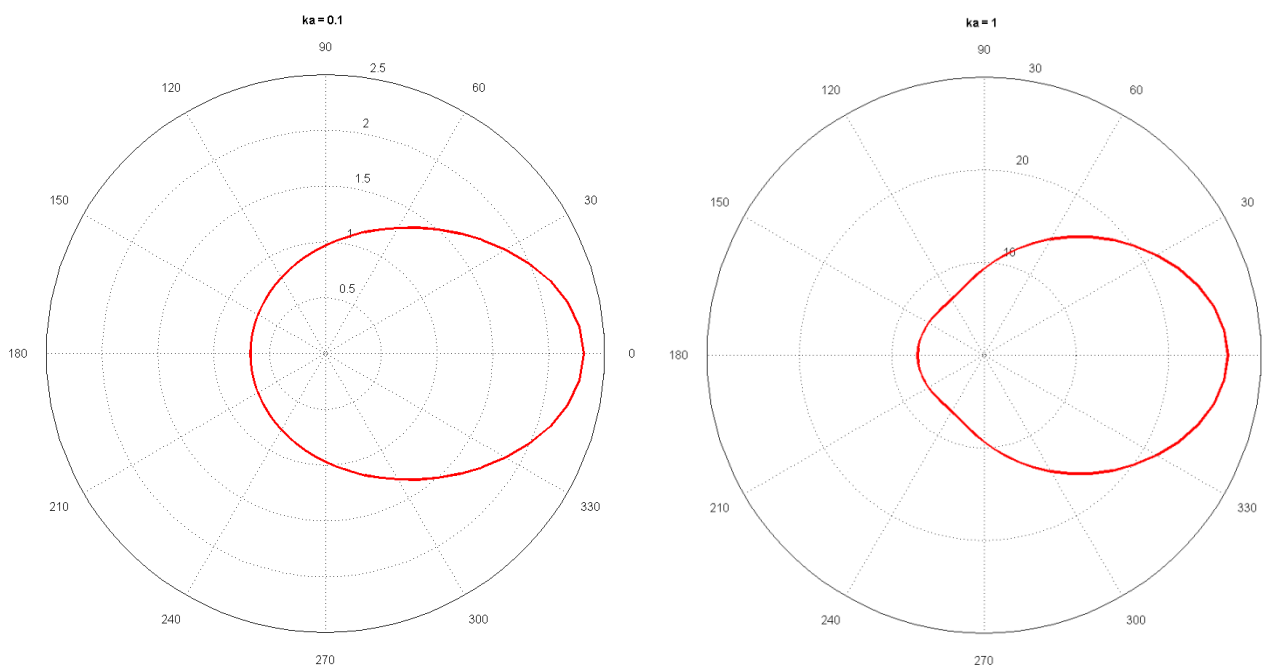
4 PRAKTICKÁ ČÁST

4.1 Směrové charakteristiky

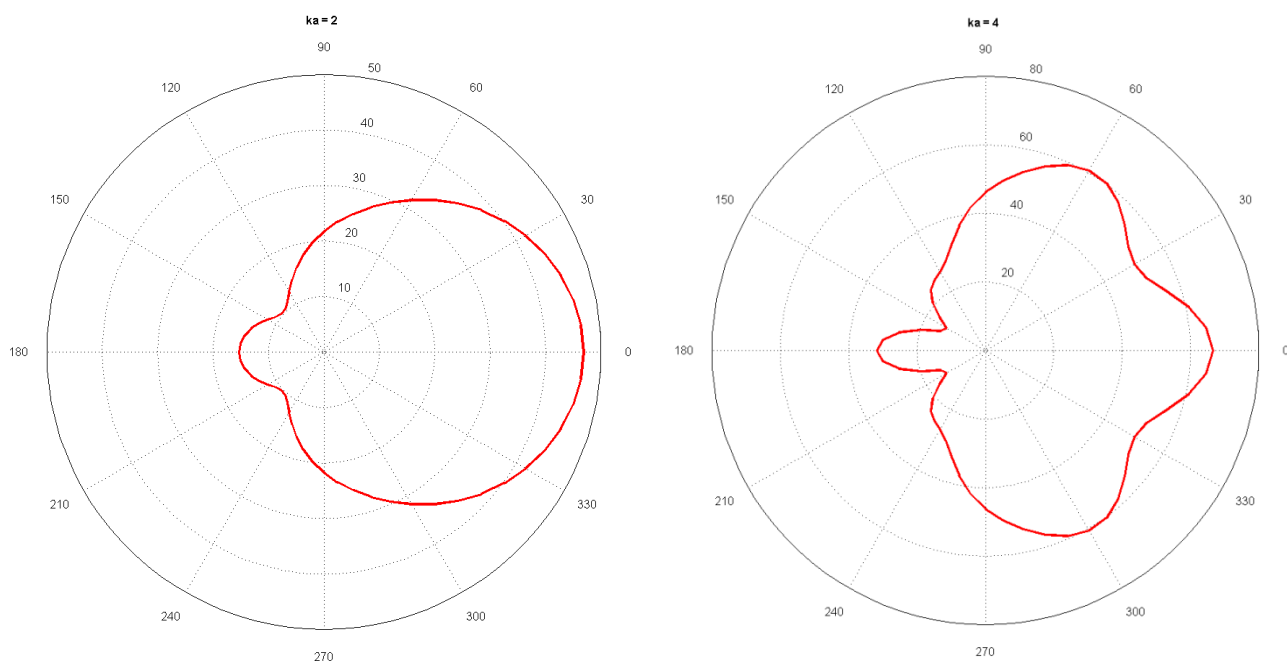
Korektnost implementace je ověřena směrovými charakteristikami podle [2], kde k jejich výpočtu bylo využito metody konečných prvků. Směrové charakteristiky znázorňují směrovou závislost absolutní hodnoty celkového akustického tlaku ve vzdálenosti $r = 1,5 \cdot a$ ($a = 8 \text{ cm}$ je poloměr sféry) od počátku souřadnic. Zdroj zvuku je umístěn ve směru 0° ve vzdálenosti 3 m od středu koule. [2,8]

4.1.1 Výsledky

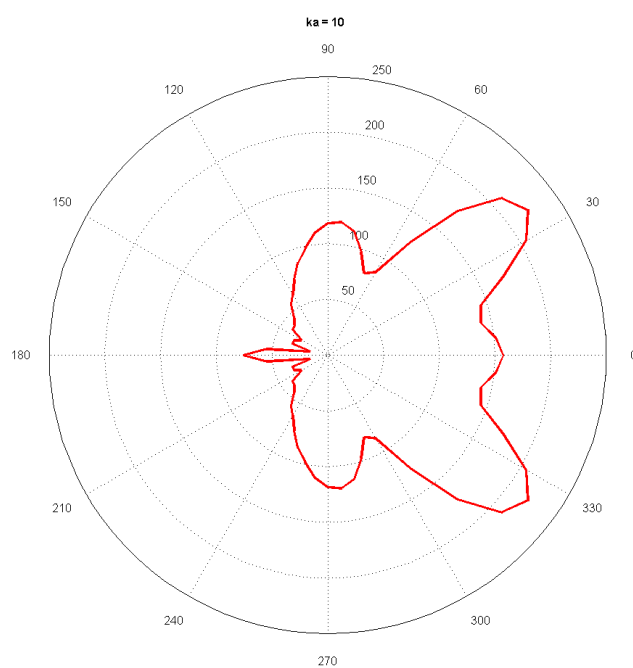
Z charakteristik je patrné, že s rostoucí hodnotou parametru ka (zvláště pro $ka \geq 1$) vzrůstá význam rozptýlené složky celkového tlaku a roste míra deformace zvukového pole.



Obr. 4.1: Směrové charakteristiky pro $ka = 0,1$ a $ka = 1$ [9]



Obr. 4.2: Směrové charakteristiky pro $ka = 2$ a $ka = 4$ [9]

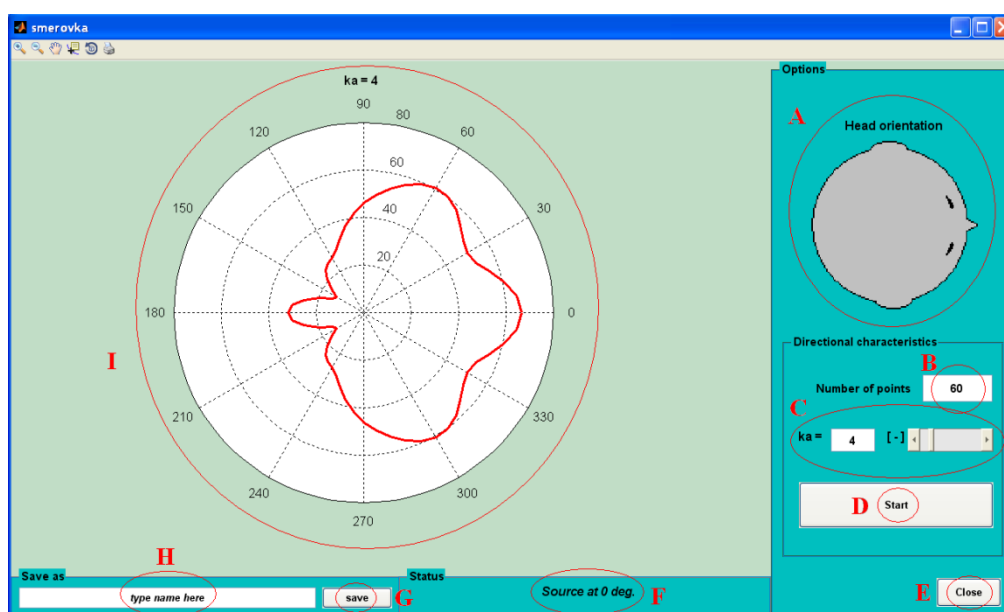


Obr. 4.3: Směrová charakteristika pro $ka = 10$ [9]

4.1.2 Grafické rozhraní

Pro pohodlnější práci s programem pro výpočet směrových charakteristik *polesmerovky.m* bylo vytvořeno grafické rozhraní s názvem *smerovka.fig* a k němu příslušící program *smerovka.m*. Stejně jako u všech následujících programů, je program ošetřen proti nežádoucím vstupním hodnotám, jako komplexní číslo, znaky, které nejsou číslo, nebo prázdná vstupní hodnota.

Prostředí (viz. Obr. 4.4) umožňuje vykreslit směrovou charakteristiku pro libovolnou hodnotu parametru ka a to v rozsahu přibližně 0,022 až 29,31, což odpovídá audio-frekvenčnímu pásmu.



Obr. 4.4: Grafické prostředí *smerovka.fig* [9]

Strukturu rozhraní lze rozdělit do několika hlavních částí:

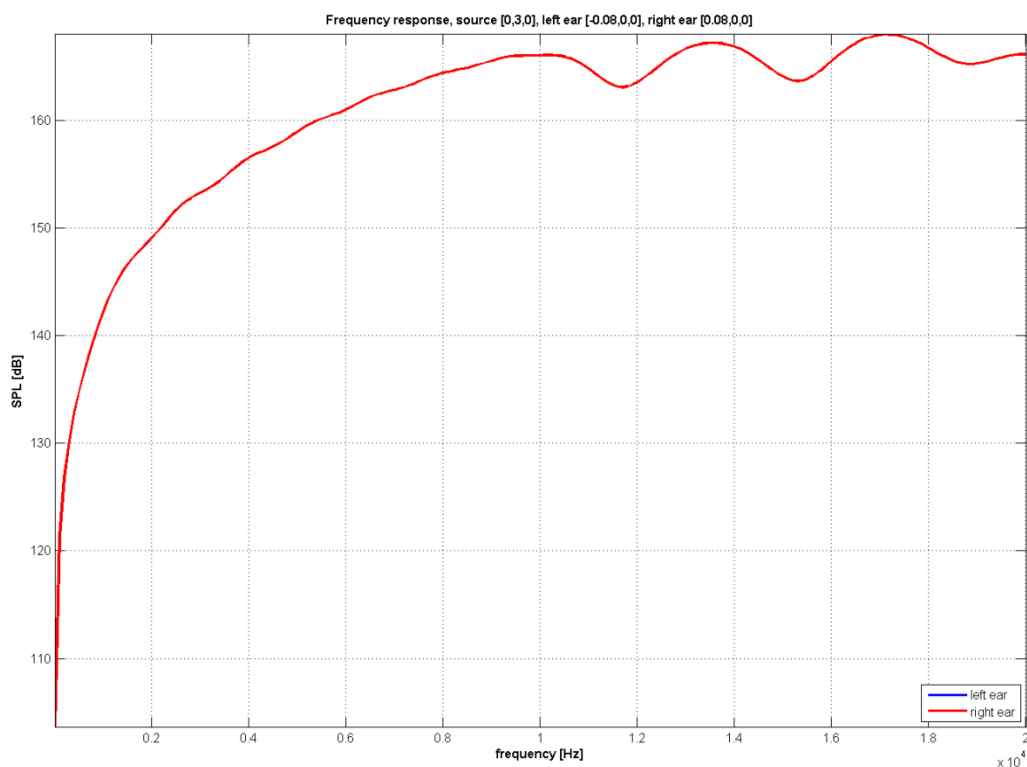
- A.....Znázornění směru, ze kterého přichází zvuk (zprava).
- B.....Volba počtu vykreslených bodů (omezeno na rozsah 4 až 720).
- C.....Volba parametru ka .
- D.....Tlačítko *Start*. Po stisknutí dojde k výpočtu a vykreslení směrové charakteristiky.
- E.....Tlačítko *Close*. Program odstraní všechny proměnné z paměti *RAM* a zavře okno.
- F.....Informační panel. Zobrazuje upozornění a informace o proběhlých akcích, jako změny parametrů, špatně zadaný vstup, uložení výpočtu.
- G.....Tlačítko *save*. Po stisknutí se uloží směrová charakteristika ve tvaru *.jpg* a *.fig* pod zvoleným názvem souborů.
- H.....Textové pole, určené pro vepsání názvu souboru (délka je omezena na 25 znaků).
- I.....Plocha pro zobrazení směrové charakteristiky po stisknutí tlačítka *start*.

4.2 Frekvenční charakteristiky

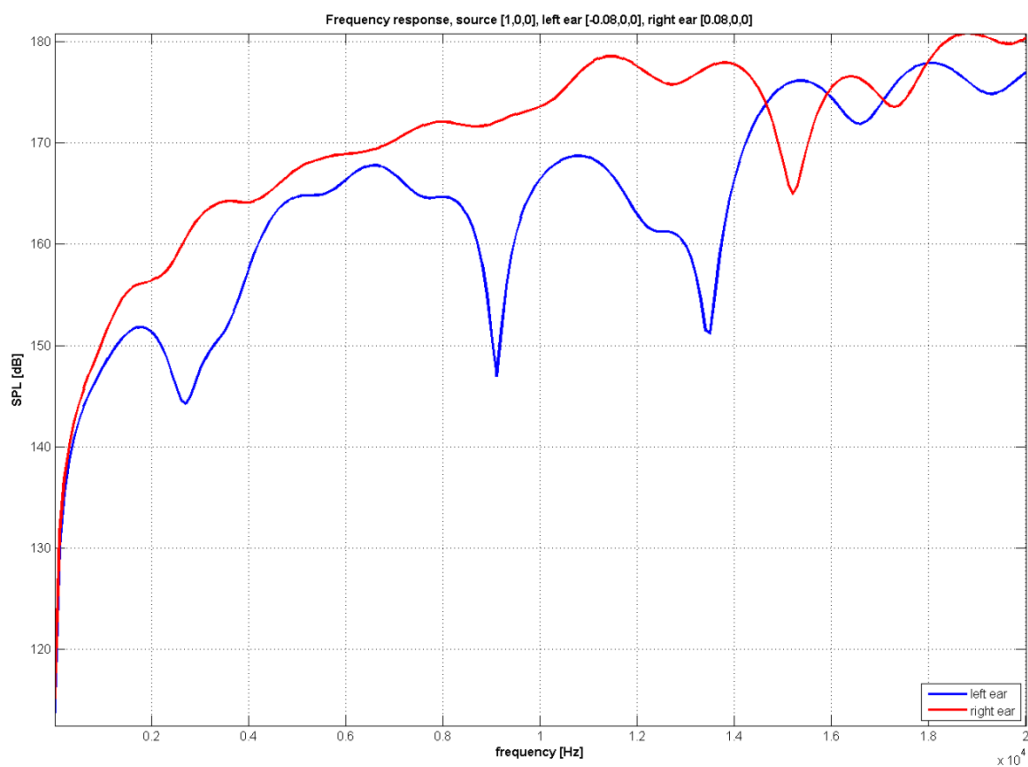
Frekvenční charakteristiky znázorňují závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci zvuku a to ve dvou bodech prostoru, které reprezentují lidské uši (dále jen „uši“). Tyto body jsou dány souřadnicemi $[x, y, z] = [-0,08, 0, 0]$ a $[x, y, z] = [0, 08, 0, 0]$. Charakteristiky pro obě uši jsou vždy vykresleny společně do jednoho okna. [1,8]

4.2.1 Výsledky

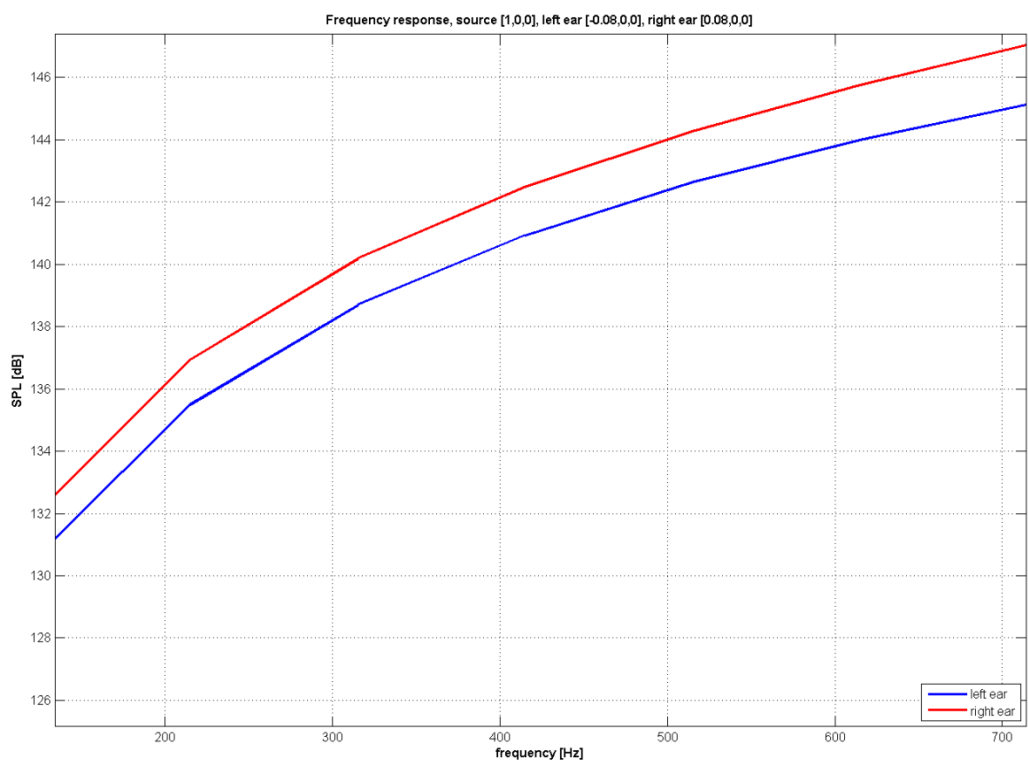
Z charakteristik je patrné, že pro frekvence, které jsou ekvivalentní $ka \leq 1$ ($f \cong 682,38 \text{ Hz}$), tvar charakteristiky není nijak ovlivněn rozptýlenou složkou celkového akustického tlaku (Obr. 4.7). Frekvenční rozsah charakteristik pokrývá rozsah audio-frekvenčního pásma. Nachází-li se zdroj v místě před hlavou (Obr. 4.5), jsou charakteristiky pro obě uši totožné a překrývají se. Pokud zdroj leží např. vpravo od hlavy (Obr. 4.6), je patrný rozdíl hladiny akustického tlaku pro jednotlivé uši a to jak v tvaru, tak i v úrovni.



Obr. 4.5: Frekvenční charakteristiky, zdroj v bodě $[x,y,z] = [0,3,0]$ [9]



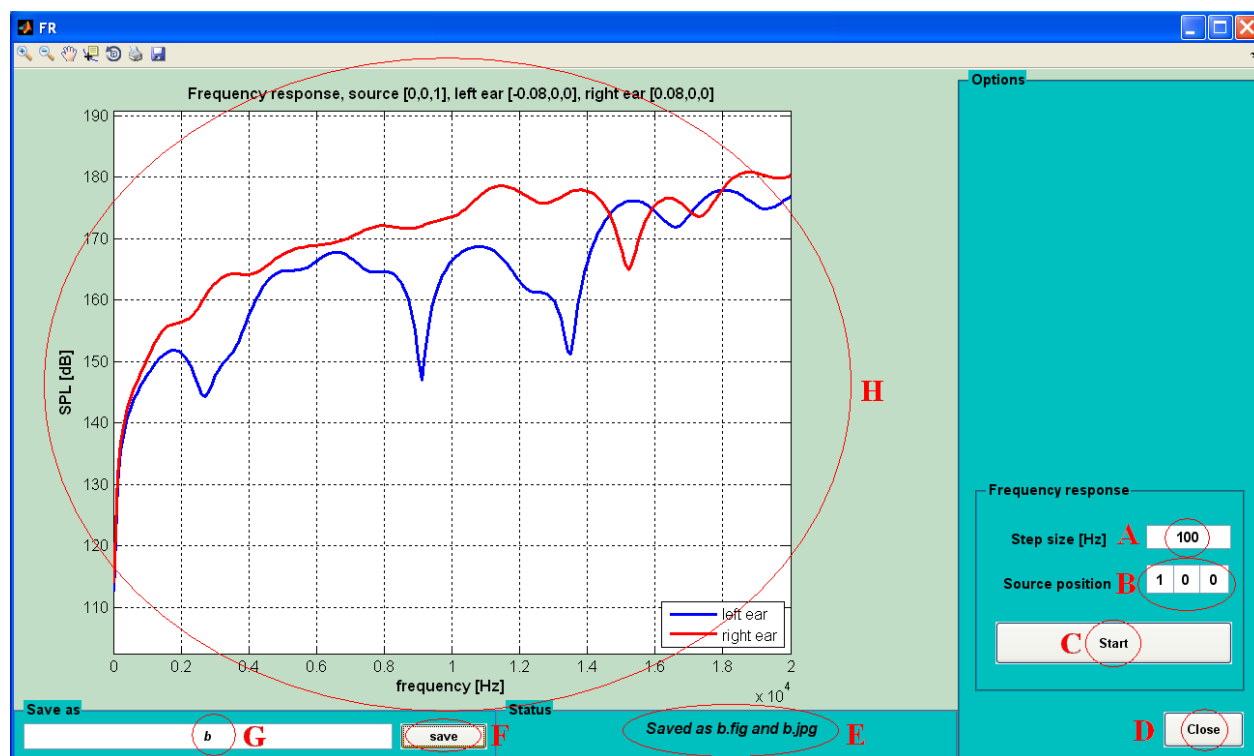
Obr. 4.6: Frekvenční charakteristiky, zdroj v bodě $[x,y,z] = [1,0,0]$ [9]



Obr. 4.7: Frekvenční charakteristiky - detail, zdroj v bodě $[x,y,z] = [1,0,0]$ [9]

4.2.2 Grafické rozhraní

Pro pohodlnější tvorbu charakteristik slouží grafické rozhraní *FCH.fig* (Obr. 4.8) spolu s programem *FCH.m*.



Obr. 4.8: Grafické rozhraní pro výpočet a uložení frekvenčních charakteristik [9]

Prostředí lze rozdělit na následující části:

- A..... Volba frekvenčního kroku (omezeno na rozsah 50 Hz až 10 kHz).
- B..... Volba polohy zdroje.
- C..... Tlačítko *Start*. Výpočet a vykreslení frekvenční odezvy pro obě uši.
- D..... Tlačítko *Close*. Po jeho stisknutí program odstraní všechny proměnné z paměti RAM a ukončí prostředí.
- E..... Informační panel. Zobrazuje upozornění a informace o proběhlých akcích.
- F..... Tlačítko *save*. Po stisknutí se uloží směrová charakteristika ve tvaru *.jpg* a *.fig* pod zvoleným názvem.
- G..... Textové pole pro vepsání názvu souboru (max. 25 znaků).
- H..... Oblast vykreslování frekvenčních charakteristik.

4.3 Plošné charakteristiky

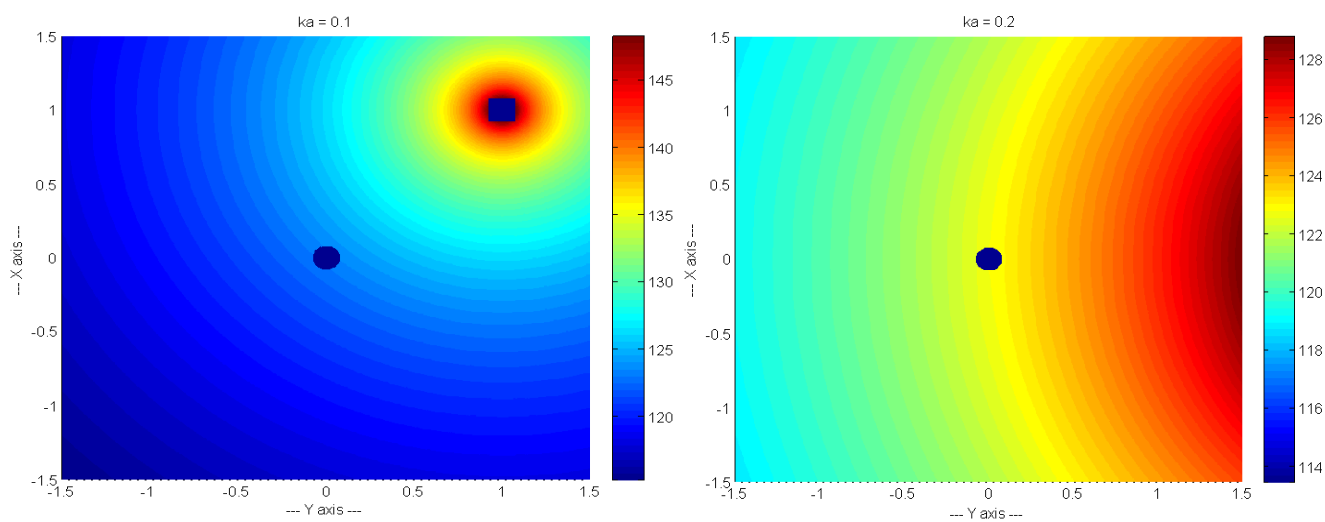
Plošné charakteristiky ukazují rozložení hladiny akustického tlaku v závislosti na frekvenci zvuku, rozmístění a počtu zdrojů, parametrech prostředí a koeficientu q každého zdroje. Prozatím je koeficient q vždy jednotkový, tedy $q = 1$. Při vykreslování charakteristik je nezbytné „maskovat“ oblast, ve které se nachází tuhá sféra a oblast, kde se nachází zdroj zvuku (Obr. 4.9 vlevo). V těchto bodech není výsledek výpočtu akustického tlaku věrohodný a pro naše účely je zároveň irelevantní.

Bylo zjištěno, že pro dva zdroje zvuku, které se nacházejí v odlišném místě prostoru, ale jejich pozice jsou definovány shodnou hodnotou úhlu φ , je výsledek nejdéle trvající části výpočtu shodný. Této skutečnosti bylo při implementaci využito pro značné urychlení výpočtů. [8]

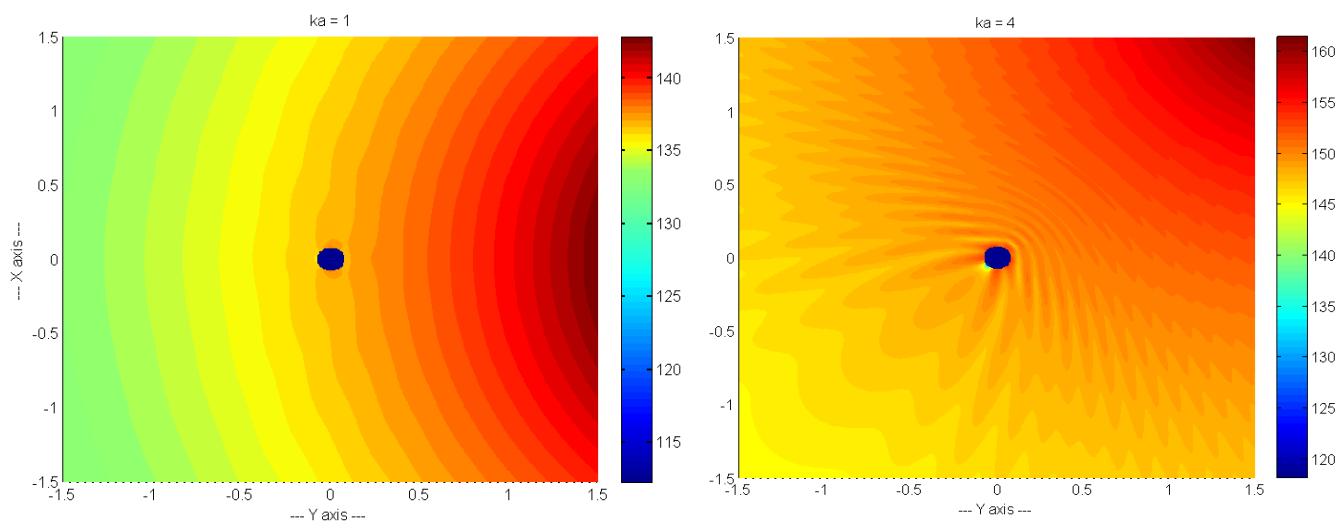
4.3.1 Výsledky

Z charakteristik je patrné, že se zvyšující se frekvencí zvuku nabývá přítomnost překážky ve zvukovém poli na významu (pro $ka \geq 1$ již dochází k deformaci zvukového pole).

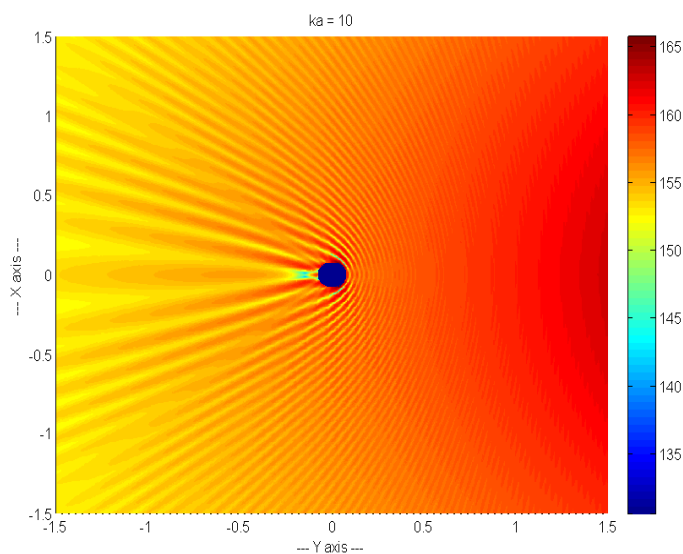
Z obrázků dále vyplývá, že je vhodnější vykreslovat tyto charakteristiky v menší oblasti. Rozptýlená část akustického tlaku pak bude v charakteristikách viditelnější a charakteristika tak poskytne více detailů. Další výhodou bude možnost zvýšení počtu vykreslovaných bodů při zachování, nebo dokonce zkrácení výpočetního času.



Obr. 4.9: Plošné charakteristiky pro $ka = 0,1$ a $ka = 0,2$ [9]



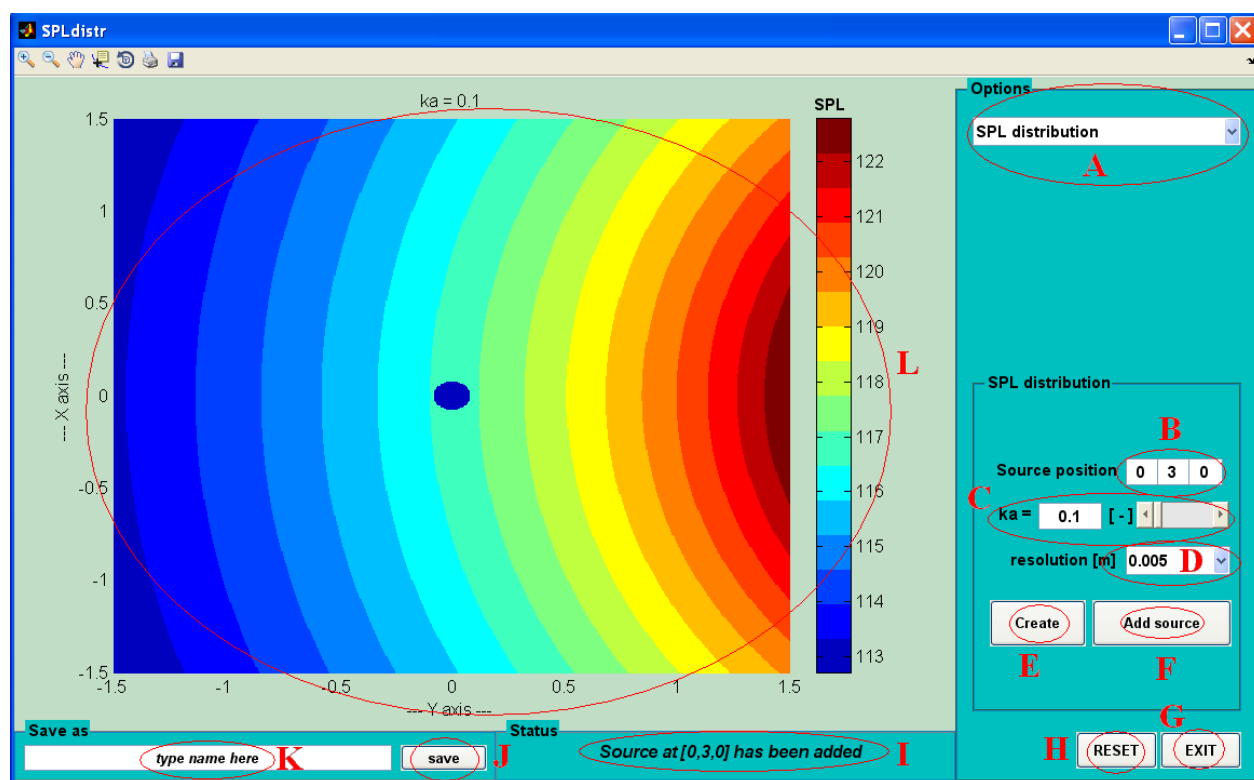
Obr. 4.10: Plošné charakteristiky pro $ka = 1$ a $ka = 4$ [9]



Obr. 4.11: Plošná charakteristika pro $ka = 10$ [9]

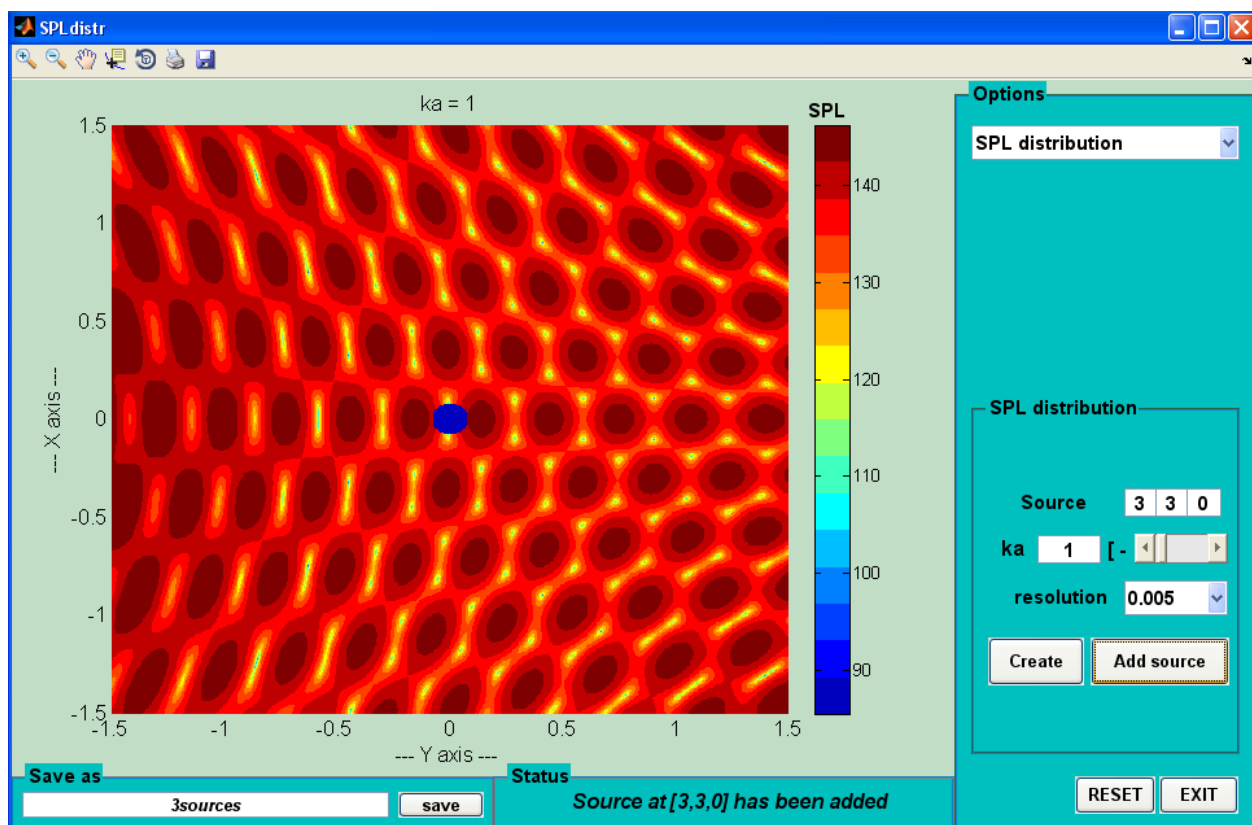
4.3.2 Grafické rozhraní

Grafické prostředí *SPLdistr.fig* zjednodušuje práci s plošnými charakteristikami. Nabízí také možnost ukládání výsledných charakteristik ve formě *.fig*, *.jpg* a *.mat* (matic akustického tlaku). Jeho nejdůležitější části jsou vyznačeny na Obr. 4.12.



Obr. 4.12: Grafické prostředí *SPLdistr.fig*, klasický režim [9]

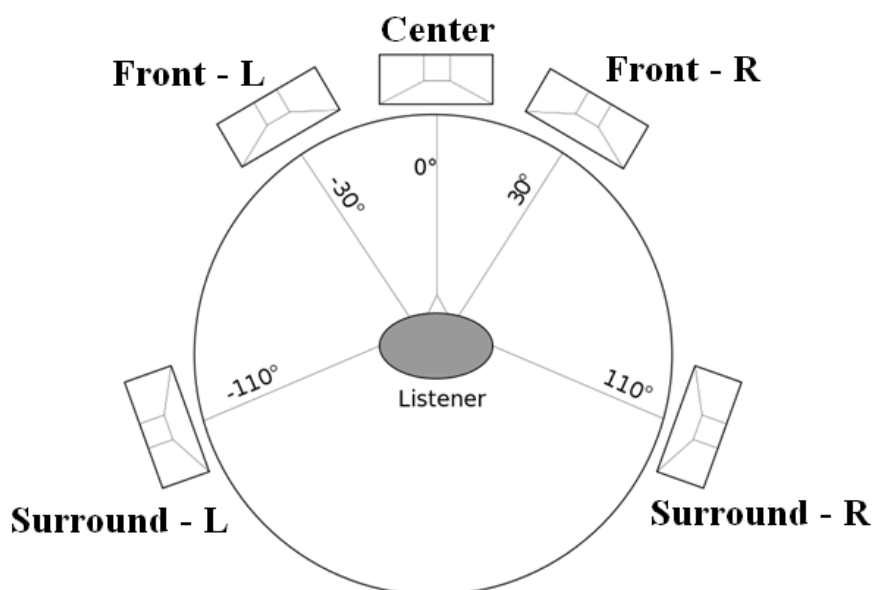
- A..... Volba mezi klasickým režimem a režimem *Dolby 5.1*.
- B..... Volba polohy zdroje v pořadí $[x,y,z]$.
- C..... Volba hodnoty parametru ka v rozsahu audio-frekvenčního pásma.
- D..... Volba prostorového rozestupu vykreslovaných bodů v rozsahu 5 až 200 mm.
- E..... Tlačítko *Create*. Po stisknutí se vytvoří a uloží příslušná matice tlaků.
- F..... Tlačítko *Add source*. K zobrazenému poli se přičte zvolená charakteristika.
- G..... Tlačítko *EXIT*. Smaže všechny proměnné z paměti *RAM* a zavře okno.
- H..... Tlačítko *RESET*. Vykreslí se pole bez přítomnosti zdrojů a nastaví se „defaultní“ hodnoty všech nastavitelných parametrů.
- I..... Informační panel. Informuje o stavu práce s programem a zobrazuje upozornění.
- J..... Tlačítko *save*. Po stisknutí uloží právě zobrazenou charakteristiku pod zvoleným názvem ve tvaru *.jpg*, *.fig* a *.mat*.
- K..... Pole pro vepsání názvu pro uložení.
- L..... Plocha pro vykreslování charakteristik.



Obr. 4.13: Zvukové pole vytvořené kombinací tří zdrojů [9]

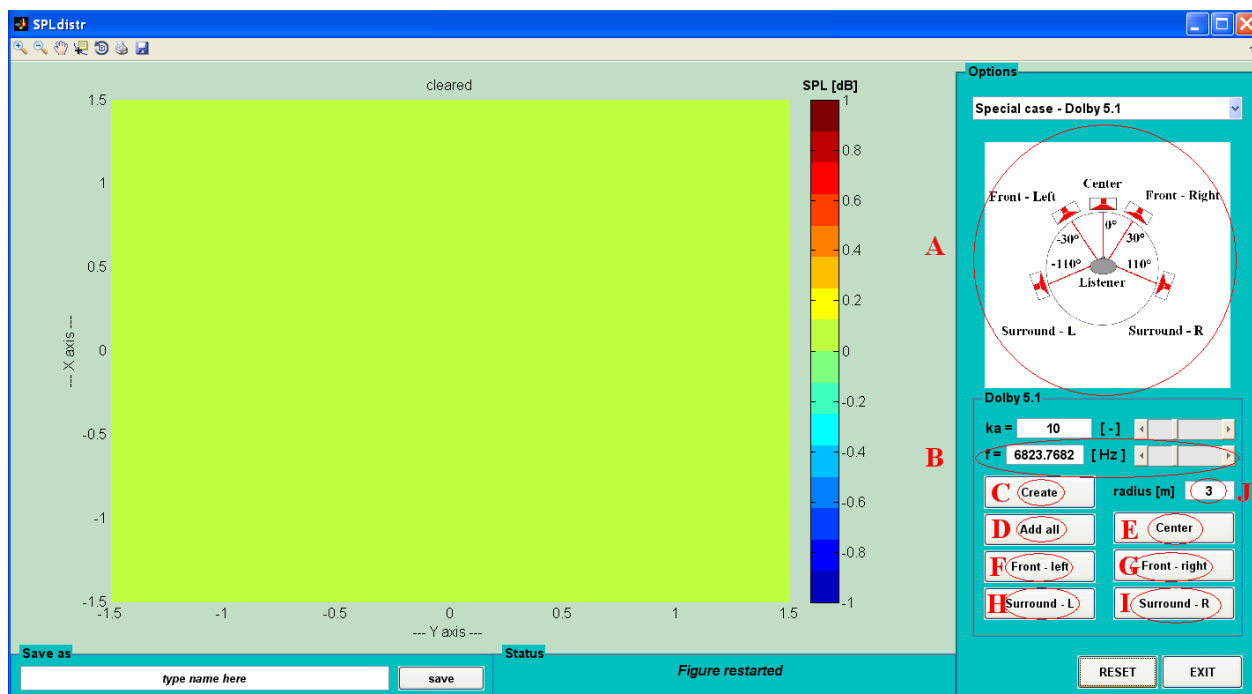
4.3.3 Dolby 5.1

V souladu s ITU standardy bylo vydáno doporučení pro rozmístění reproduktorů a hlavy posluchače, popsané obrázkem 4.14. [5]



Obr. 4.14: Konfigurace Dolby surround 5.1 [6]

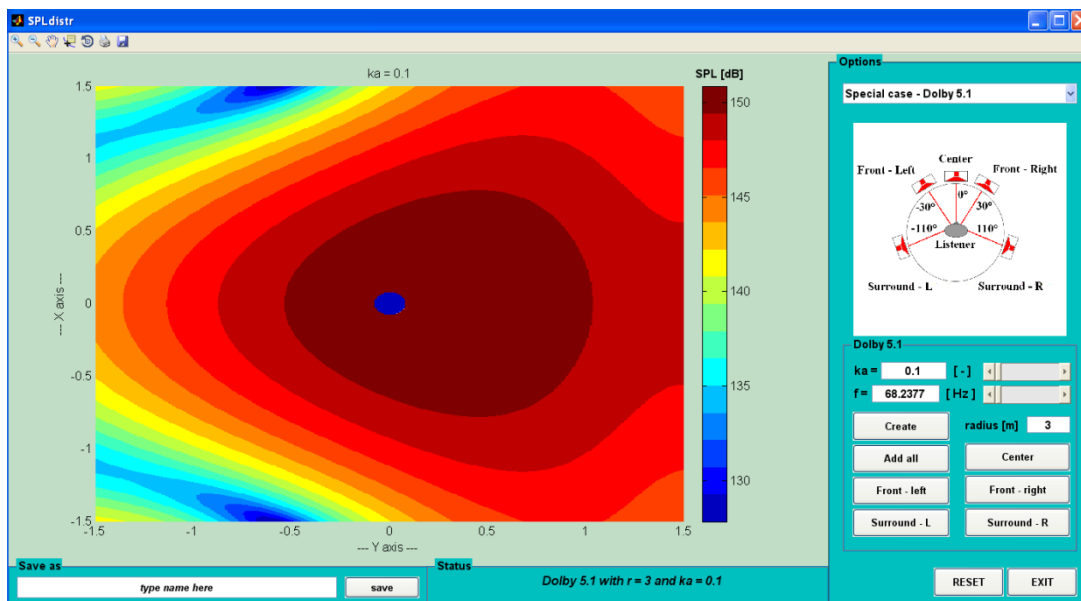
Tento speciální případ rozmístění reproduktorů je implementován v grafickém prostředí *SPLdistr.fig* v režimu *Dolby 5.1* (viz. Obr. 4.15).



Obr. 4.15: Grafické prostředí *SPLdistr.fig* v režimu *Dolby 5.1* [6,9]

Mezi nejdůležitější odlišnosti od klasického režimu patří:

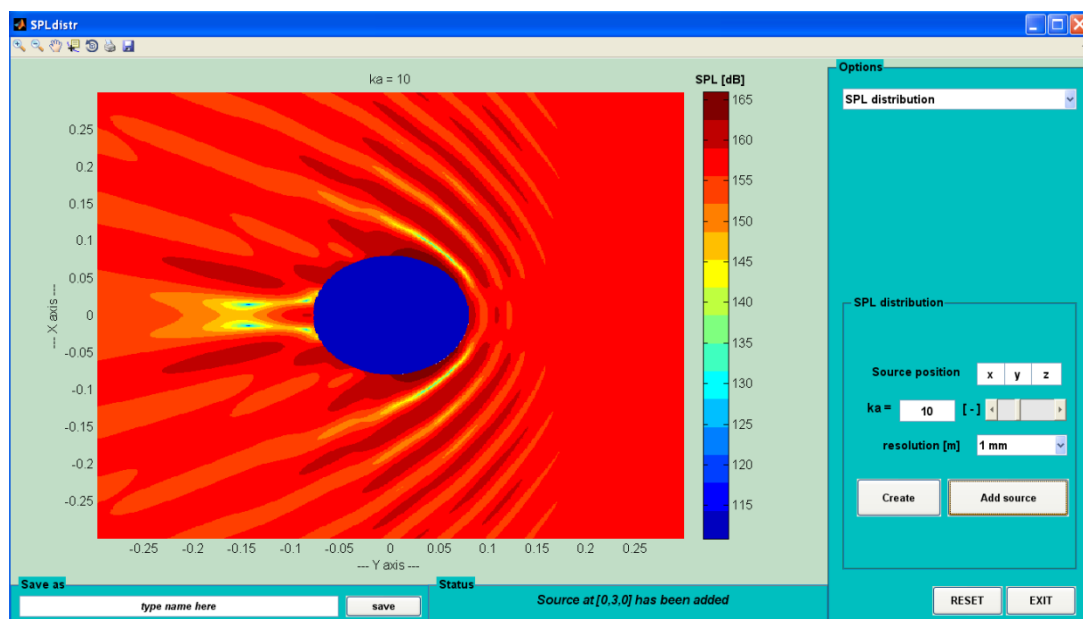
- A.....Zobrazení konfigurace reproduktorů podle standardu *Dolby 5.1*.
- B.....Volba frekvence v rozsahu 15 *Hz* až 20 *kHz*.
- C.....Tlačítko *Create*. Vytvoří a uloží se matice hodnot akustického tlaku pro všechny reproduktory v sestavě.
- D.....Tlačítko *Add all*. Vykreslí se pole vzniklé příspěvky od všech zdrojů sestavy.
- E.....Tlačítko *Center*. K celkovému poli se přičte příspěvek od předního středového reproduktoru.
- F.....Tlačítko *Front-left*. K celkovému poli se přičte příspěvek od předního levého reproduktoru.
- G.....Tlačítko *Front-right*. K celkovému poli se přičte příspěvek od předního pravého reproduktoru.
- H.....Tlačítko *Surround-L*. K celkovému poli se přičte příspěvek od zadního levého reproduktoru.
- I.....Tlačítko *Surround-R*. K celkovému poli se přičte příspěvek od zadního pravého reproduktoru.
- J.....Volba vzdálenosti zdrojů od počátku souřadnic.



Obr. 4.16: Rozložení hladiny akustického tlaku pro $ka = 0,1$ [9]

4.3.4 Zmenšení oblasti vykreslování

Jak již bylo uvedeno v části 4.3.1 na straně 18, omezení oblasti vykreslování plošných charakteristik přináší řadu výhod. Nejdůležitější výhodou je zvýšení množství detailů, což se ukáže vhodným při následné syntéze, zejména při vykreslování tzv. „chybového pole“. Proto byla vytvořena modifikace grafického rozhraní *SPLdistr.fig* a skriptu *SPLdistr.m*, která pracuje s oblastí $0,3 \times 0,3$ m okolo „hlavy“. Oproti klasické verzi programu nabízí možnost volby vzdálenosti mezi jednotlivými body v rozsahu od 0,5 mm až 5 mm.



Obr. 4.17: Modifikace grafického prostředí *SPLdistr.fig*, $ka = 10$ [9]

4.4 Syntéza pole

Tato kapitola dokumentuje vývoj programu *synt.m*, jehož cílem je tzv. „syntéza pole“. Postup syntézy lze zjednodušit do následujících kroků:

- i. Vypočítáme matici hodnot akustického tlaku, tzv. „originální pole“ pro daný zdroj, nebo kombinaci zdrojů s libovolnými hodnotami q .
- ii. Zvolíme počet zdrojů (a jejich rozmístění) replikujících pole originální (dále jen tzv. „replikanti“).
- iii. Vybereme souřadnice a počet bodů, ve kterých musí dojít ke stoprocentní replikaci (dále jen tzv. „body zájmu“). Na těchto pozicích se program snaží vytvořit hodnoty akustického tlaku co nejvíce podobné (ideálně identické), hodnotám v poli originálním.
- iv. Vypočteme matici hodnot akustického tlaku pro každého replikanta zvlášť. Zde jsou hodnoty q jednotkové.
- v. Určíme hodnoty prvků matice M . Předpokládáme, že:

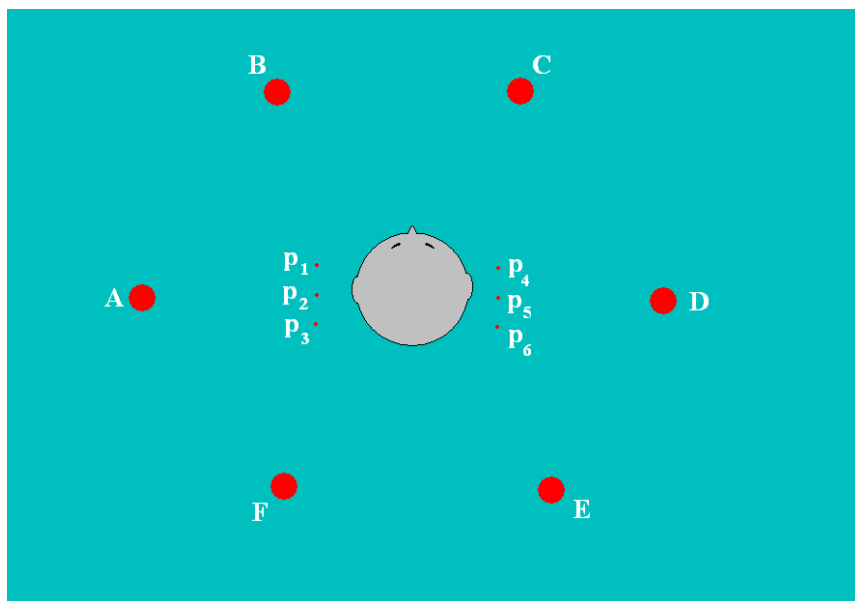
$$\begin{bmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & \cdots & M_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{m1} & \cdots & M_{mn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix}, \quad (27)$$

kde $p_1 \dots p_m$ je vektor hodnot akustického tlaku v bodech zájmu v originálním poli, $q_1 \dots q_n$ je vektor hodnot koeficientů jednotlivých replikantů a M_{mn} je hodnota akustického tlaku v bodě m způsobená přítomností replikanta n .

- vi. Vypočteme optimální hodnoty prvků vektoru q , tedy q_{opt} následujícím postupem:

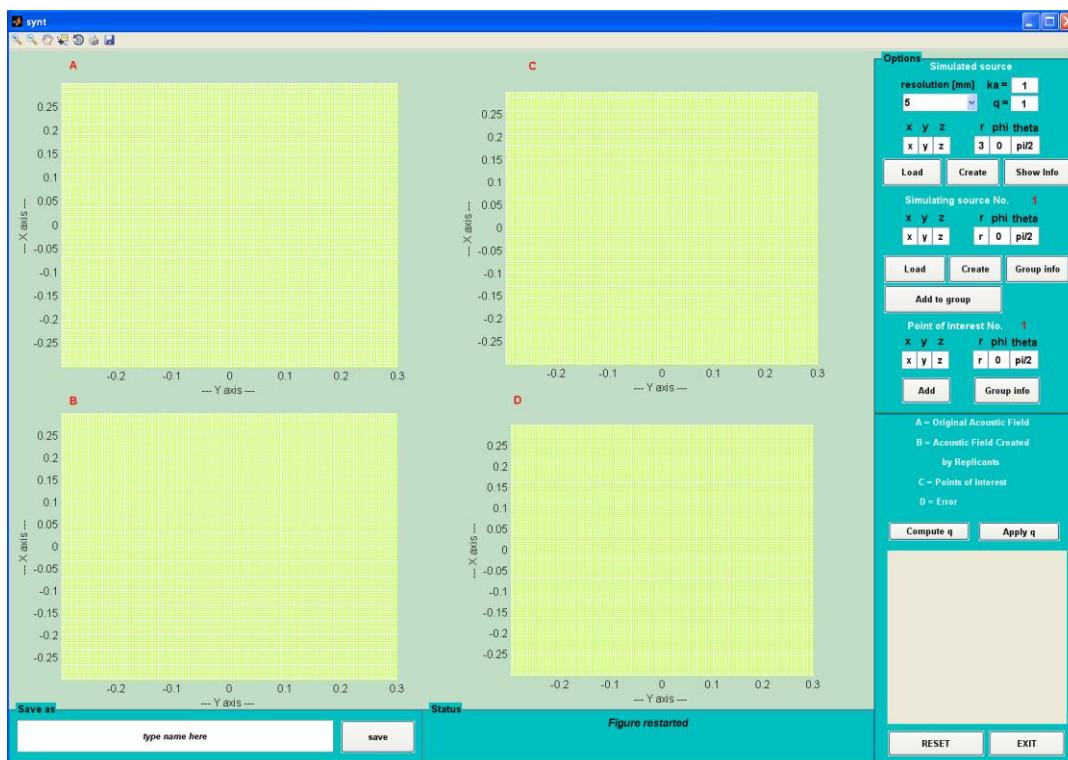
$$\begin{bmatrix} q_{opt1} \\ \vdots \\ q_{optn} \end{bmatrix} = M^{-1} \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_m \end{bmatrix}, \quad (28)$$

- vii. Daným replikantům zaměníme původní jednotkové hodnoty q za nové, vypočítané hodnoty q_{opt} . [8]


 Obr. 4.18: Příklad rozmístění replikantů (A až F) a bodů zájmu (p_1 až p_6)

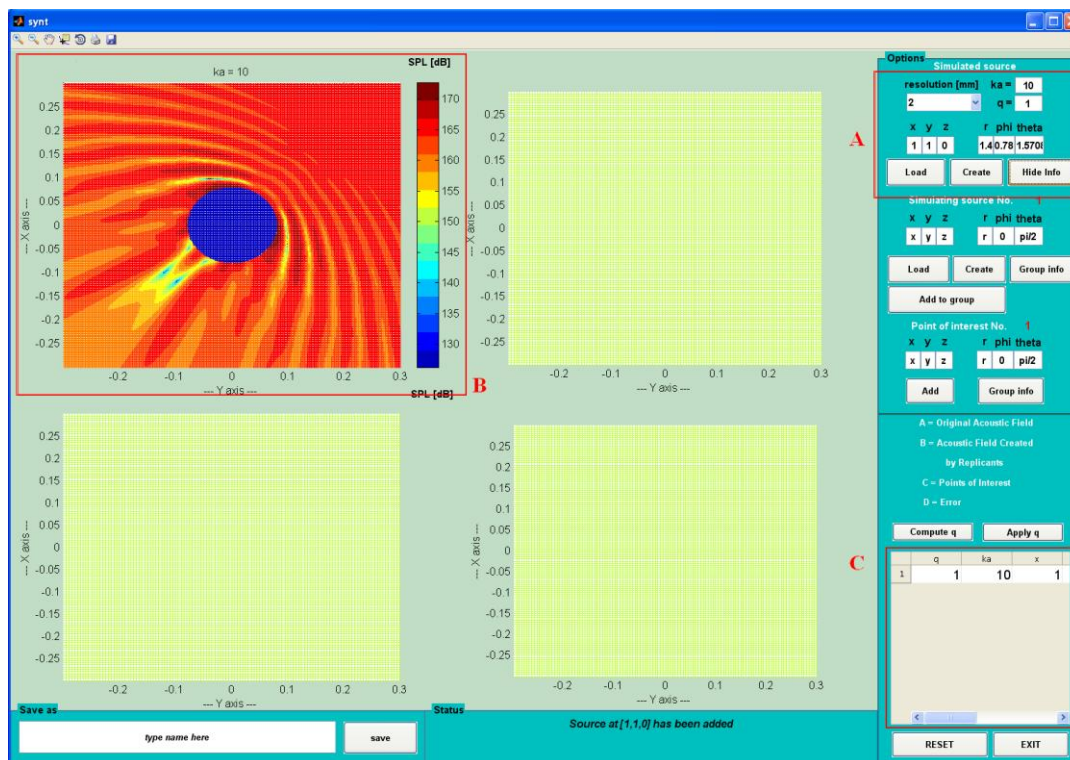
4.4.1 Implementace

Pro lepší orientaci při práci s mezivýsledky syntézy a zvýšení přehlednosti slouží grafické prostředí *synt.fig* (viz Obr. 4.19) a skript *synt.m*.


 Obr. 4.19: Grafické prostředí *synt.fig* [9]

Samotná syntéza pak při dodržení postupu ze začátku kapitoly probíhá následovně:

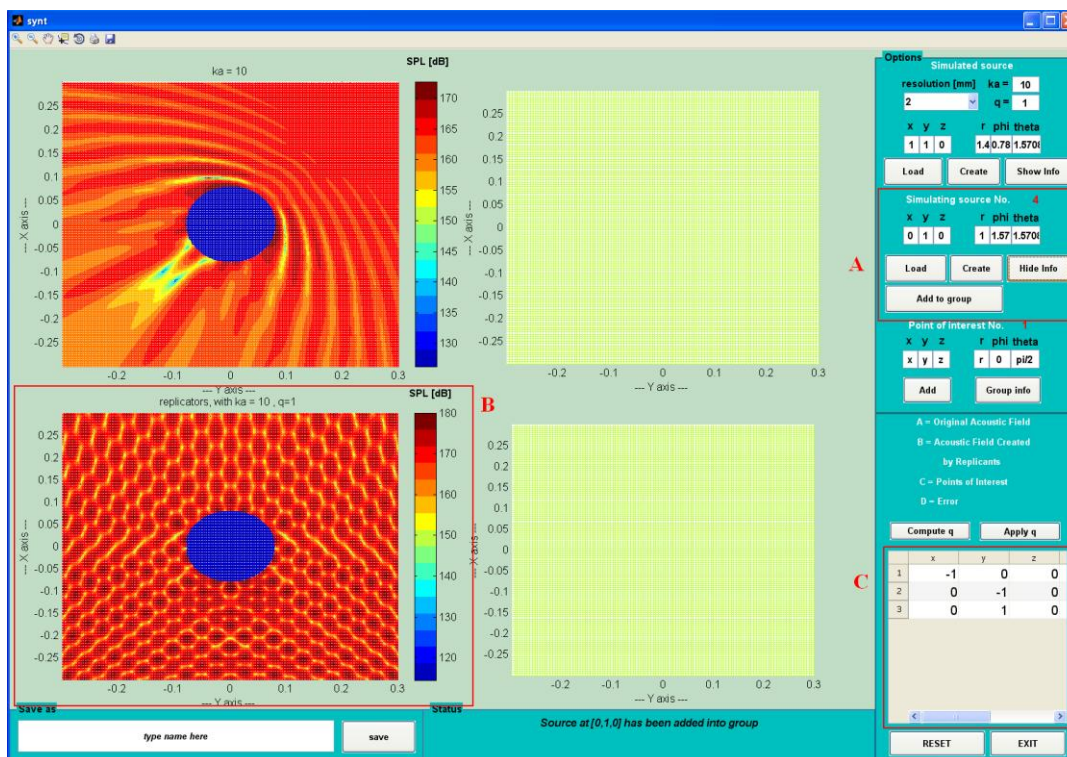
- i. Vypočítáme tzv. „originální pole“ pro zdroje s libovolnými hodnotami q .



Obr. 4.20: Grafické prostředí *synt.fig*, tvorba originálního pole [9]

- A.....Nastavení vlastností zdrojů a vytvoření originálního pole. Počet zdrojů, tvořících originální pole, není omezen.
- B.....Oblast vykreslení originálního pole.
- C.....Informace o aktuálních hodnotách parametrů posledního přidaného zdroje.

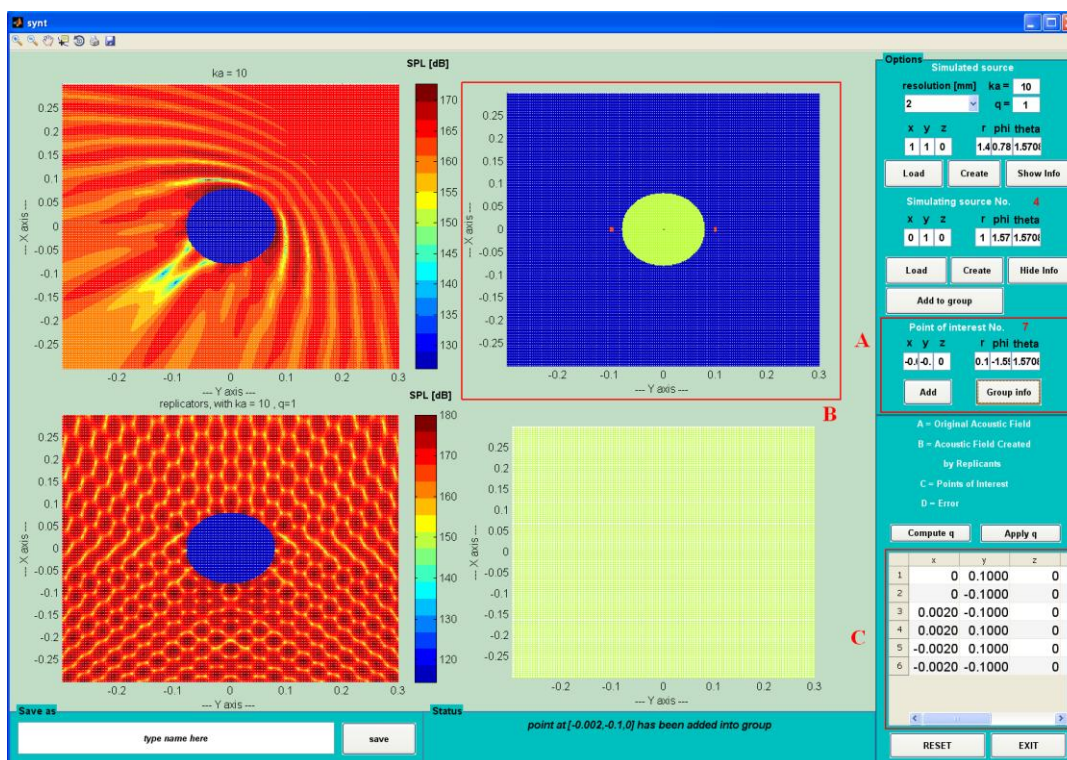
ii. Vytvoříme skupinu replikantů s jednotkovými koeficienty q .



Obr. 4.21: Grafické prostředí *synt.fig*, tvorba skupiny replikantů [9]

- A.....Zobrazení pořadového čísla následujícího replikanta (*Simulating source No.*), volba polohy replikantů, tvorba replikantů (*Create*), zobrazení jednotlivých replikantů (*Load*), přidání replikanta do skupiny a vykreslení pole (*Add to group*).
- B.....Oblast vykreslování.
- C.....Informace o aktuálních hodnotách parametrů replikantů.

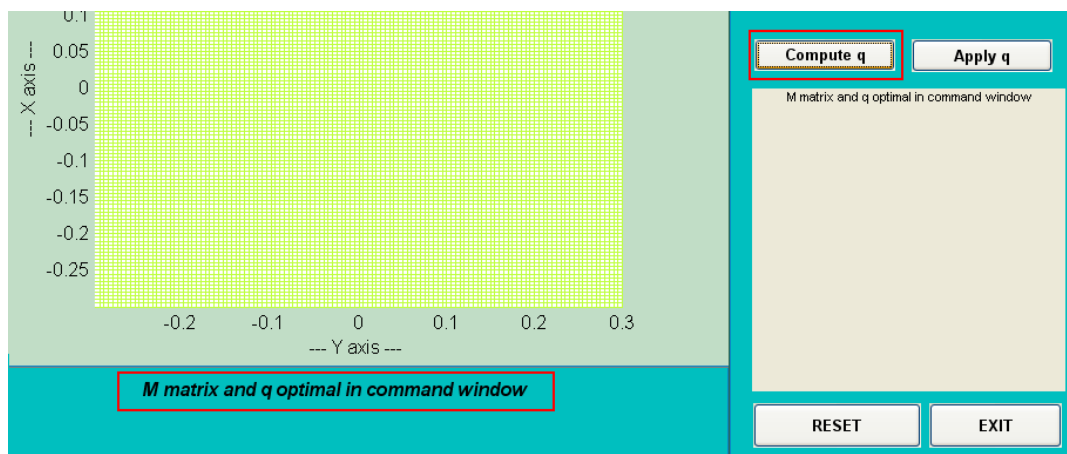
iii. Zvolíme polohy jednotlivých bodů zájmu.



Obr. 4.22: Grafické prostředí *synt.fig*, volba umístění bodů zájmu [9]

- A.....Zobrazení pořadového čísla následujícího bodu zájmu (*Point of interest No.*), volba polohy bodů zájmu, přidání bodu zájmu do skupiny bodů (*Add*).
- B.....Oblast vykreslení rozmístění jednotlivých bodů.
- C.....Informace o aktuálních pozicích jednotlivých bodů.

iv. Určíme hodnoty prvků matice M a vypočítáme q_{opt} , tedy optimální koeficienty pro jednotlivé replikanty. Výpočet se uskuteční po stisknutí tlačítka *Compute q*.



Obr. 4.23: Grafické prostředí *synt.fig*, Výpočet q_{opt} [9]

```

MATLAB 7.12.0 (R2011a)
File Edit Debug Desktop Window Help
C:\Documents and Settings\Bironc\Plocha\SGS 3.0\Field synthesis - Zoom
Shortcuts How to Add What's New

Current Folder
M =

1.0e+003 *

1.7831 - 6.6113i -4.7431 + 0.2934i -3.1930 - 2.5074i
1.7831 - 6.6113i -3.1930 - 2.5074i -4.7431 + 0.2934i
3.1039 - 6.1054i -3.1956 - 2.5149i -4.6790 + 0.2787i
3.1039 - 6.1054i -4.6790 + 0.2787i -3.1956 - 2.5149i
0.3772 - 6.7963i -4.6790 + 0.2787i -3.1956 - 2.5149i
0.3772 - 6.7963i -3.1956 - 2.5149i -4.6790 + 0.2787i

ans =

position of original source = [1,1,0]

ans =

optimal q for source No. 1 located at [-1,0,0] is q = 0.2058+0.31906i

ans =

optimal q for source No. 2 located at [0,-1,0] is q = 0.5322-0.661i

ans =

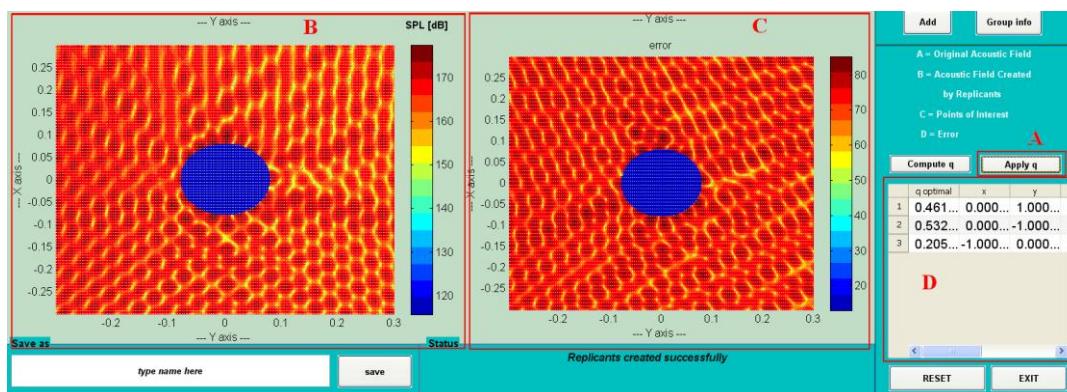
optimal q for source No. 3 located at [0,1,0] is q = 0.46143-0.065152i

fx >>
Start OVR

```

Obr. 4.24: Výsledek výpočtu q_{opt} se ukládá do paměti RAM a zároveň se vypisuje do *Command Window* [9]

- v. Daným replikantům zaměníme původní jednotkové hodnoty q za nové, vypočítané hodnoty q_{opt} . K tomu slouží tlačítko *Apply q*. Po jeho stisknutí se vykreslí pole vytvořené replikanty s upravenými hodnotami q .



Obr. 4.25: Pole po aplikaci q_{opt} (B) a tzv. „chybové pole“ (C) [9]

- A.....Tlačítko *Apply q*, po stisknutí se matice hodnot p_a příslušící každému replikantu vynásobí daným (nenulovým) koeficientem q_{opt} , který byl programem navržen.
- B.....Oblast vykreslení upraveného pole, vytvořeného replikanty po aplikaci q_{opt} .
- C.....Tzv. „chybové pole“, které je definováno jako:

$$E = 20 \cdot \log_{10}(|p_{orig} - p_{reptic}|) \quad [dB], \quad (29)$$

kde p_{orig} je matice hodnot p_a originálního pole a p_{reptic} je matice hodnot p_a replikovaného pole. Chybové pole znázorňuje míru kvality replikace.

- D.....Informace o hodnotách parametrů jednotlivých replikantů.

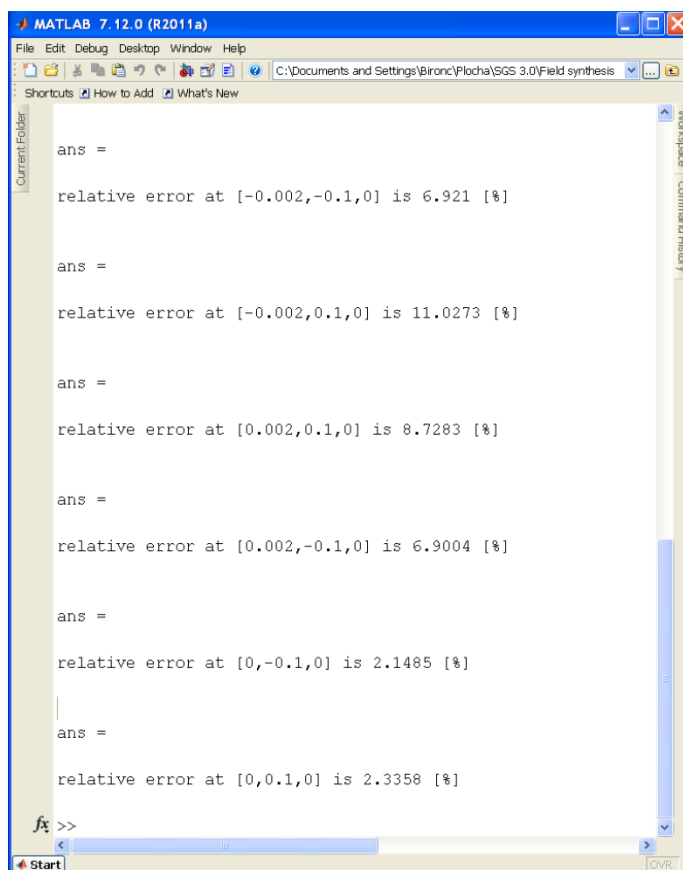
[8]

4.5 Relativní chyba replikace

Protože vykreslené chybové pole může být pro přesnou kvantifikaci chyby replikace nedostačující, definujeme tzv. relativní chybu replikace podle [8], jako:

$$\Delta = \left(\frac{|p_{orig} - p_{replc}|}{|p_{orig}|} \right) \cdot 100 \quad [\%], \quad (30)$$

Po zobrazení chybového pole se do příkazového řádku vypíše hodnoty relativní chyby replikace v jednotlivých bodech zájmu.



```
MATLAB 7.12.0 (R2011a)
File Edit Debug Desktop Window Help
C:\Documents and Settings\Bironc\Plocha\SGS 3.0\Field synthesis
Shortcuts How to Add What's New

ans =
relative error at [-0.002,-0.1,0] is 6.921 [%]

ans =
relative error at [-0.002,0.1,0] is 11.0273 [%]

ans =
relative error at [0.002,0.1,0] is 8.7283 [%]

ans =
relative error at [0.002,-0.1,0] is 6.9004 [%]

ans =
relative error at [0,-0.1,0] is 2.1485 [%]

ans =
relative error at [0,0.1,0] is 2.3358 [%]

fx >>
```

Obr. 4.26: Relativní chyba v bodech zájmu [9]

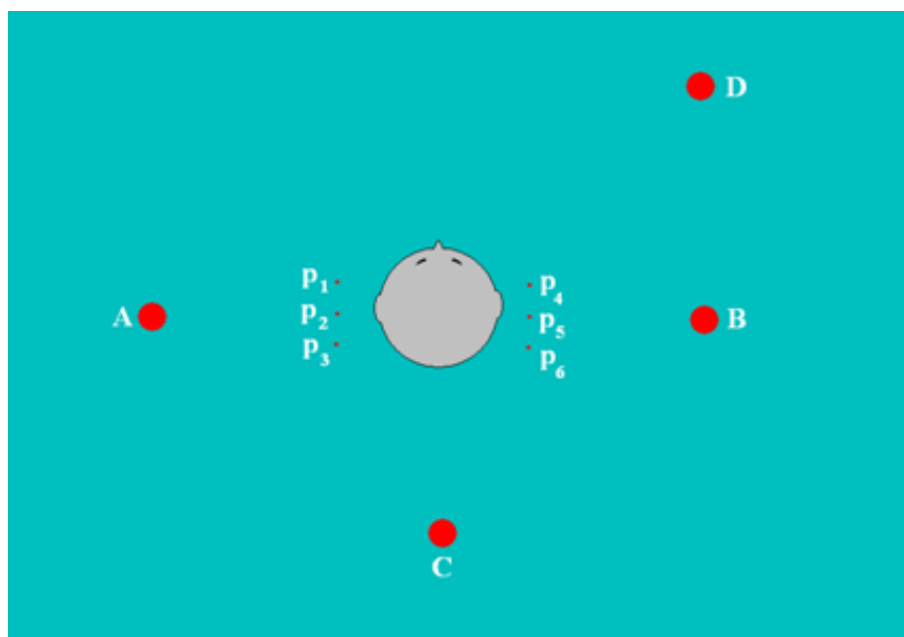
4.5.1 Závislost kvality replikace na parametru ka

V této části kapitoly je zkoumána závislost průměrné relativní chyby replikace na zvoleném parametru ka . Průměrná relativní chyba replikace, je zvolena, jako:

$$\bar{\Delta} = \sum_{n=1}^N \Delta_{pn} \quad [\%], \quad (31)$$

kde n je pořadové číslo bodu zájmu, N je celkový počet bodů zájmu a Δ_{pn} je relativní chyba replikace v n -tém bodě zájmu.

Závislost $\bar{\Delta}$ na parametru ka pro konstantní rozmístění replikantů, bodů zájmu a originálních zdrojů je znázorněna na obr. 4.28.



Obr. 4.27: Konfigurace úlohy

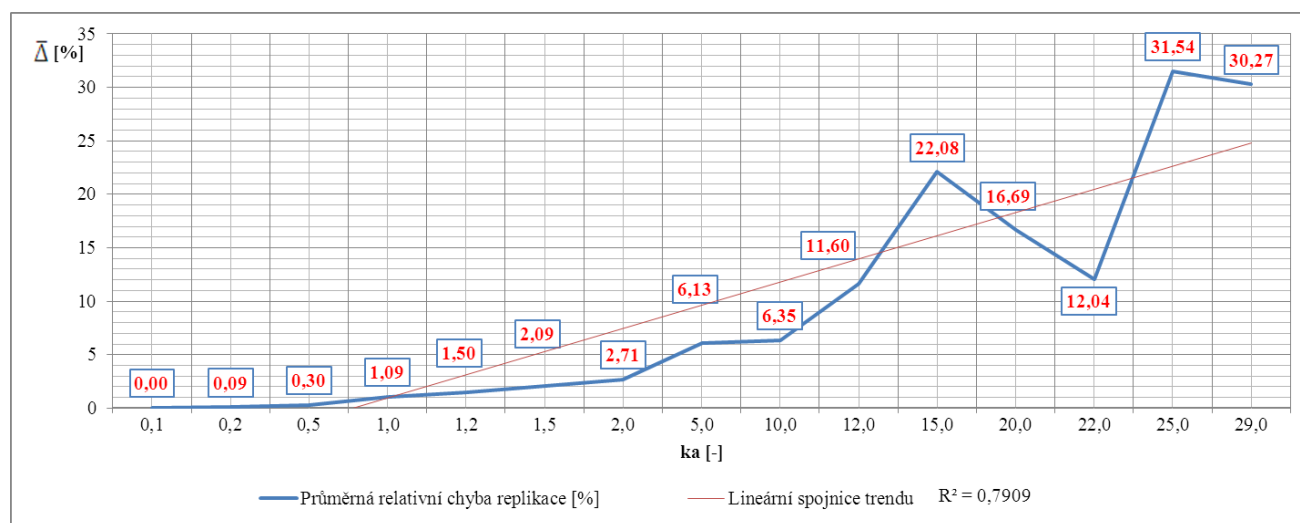
A, B, C.....Replikanti v bodech $[0,-1,0]$, $[0,1,0]$ a $[-1,0,0]$.

D.....Zdroj v místě $[1,1,0]$, tvořící originální pole.

p_1 až p_6Body zájmu, rozmístěné u bodů, reprezentujících lidské uši.

Tabulka 4.1: Závislost relativní chyby replikace na parametru ka

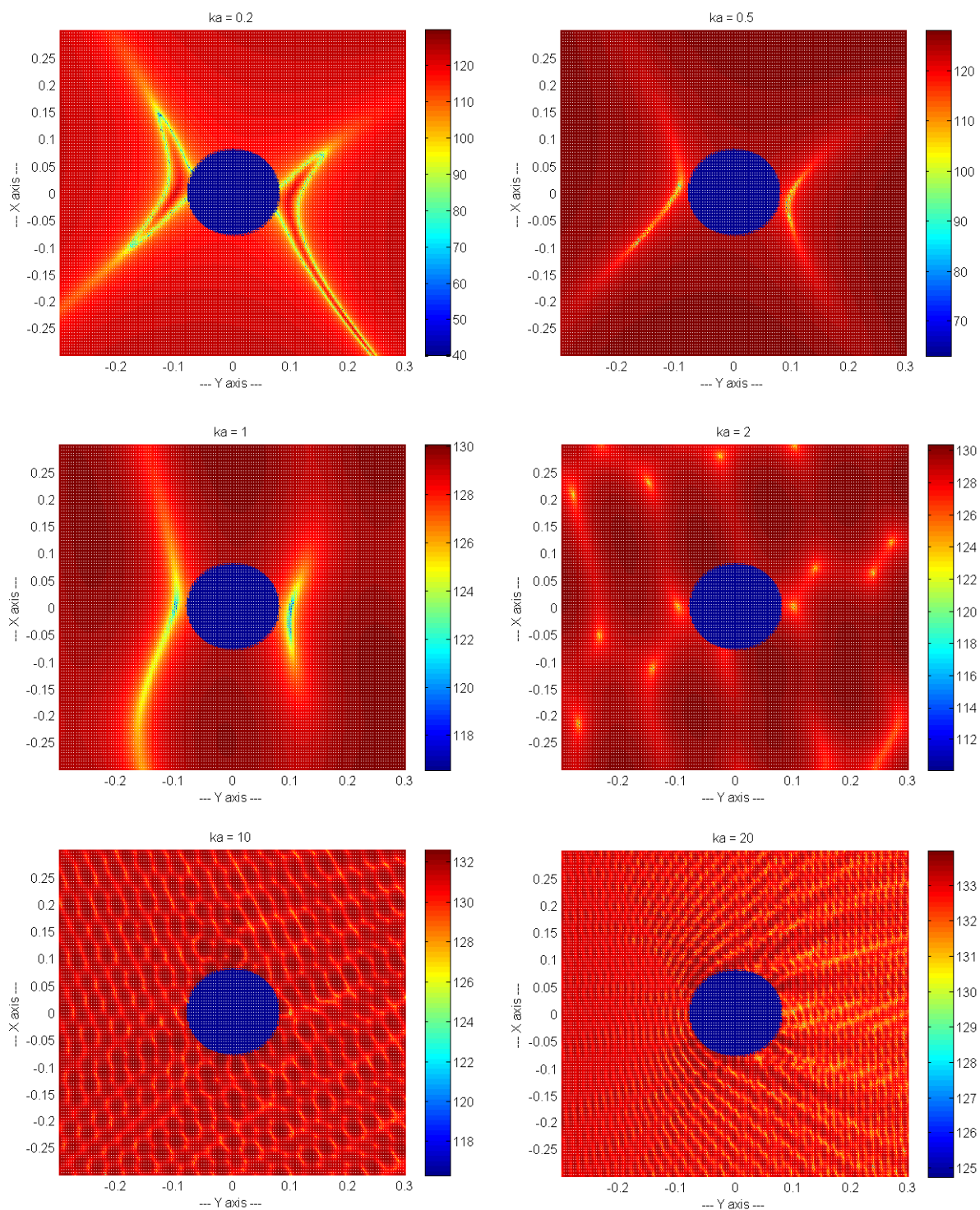
Poloha [x y z]	[0 -0,1 0]	[0 0,1 0]	[0,002 -0,1 0]	[0,002 0,1 0]	[-0,002 -0,1 0]	[-0,002 0,1 0]	
ka [-]	Δ_{p1} [%]	Δ_{p2} [%]	Δ_{p3} [%]	Δ_{p4} [%]	Δ_{p5} [%]	Δ_{p6} [%]	$\bar{\Delta}$ [%]
0,1	0,08	0,00	0,03	0,03	0,00	0,03	0,03
0,2	0,31	0,00	0,09	0,08	0,00	0,08	0,09
0,5	0,46	0,01	0,47	0,43	0,01	0,42	0,30
1,0	1,68	0,04	1,73	1,56	0,04	1,52	1,09
1,2	2,32	0,06	2,35	2,12	0,03	2,10	1,50
1,5	3,27	0,03	3,30	2,96	0,03	2,96	2,09
2,0	4,22	0,06	4,25	3,79	0,07	3,86	2,71
5,0	8,20	0,16	8,21	10,05	0,36	9,81	6,13
10,0	6,90	2,15	6,92	8,73	2,34	11,03	6,35
12,0	18,81	1,11	16,76	14,71	1,29	16,89	11,60
15,0	41,66	12,60	30,21	23,49	7,75	16,76	22,08
20,0	35,55	8,00	23,58	11,13	5,67	16,22	16,69
22,0	8,01	5,72	12,45	13,53	3,27	7,27	12,04
25,0	18,32	61,24	42,56	12,83	13,27	16,02	31,54
29,0	19,23	22,13	61,33	20,52	14,09	15,29	30,27



Obr. 4.28: Závislost $\bar{\Delta}$ na parametru ka pro konfiguraci dle předchozího obrázku

Bylo zjištěno, že s rostoucí hodnotou parametru ka obecně roste hodnota průměrné relativní chyby replikace. Z charakteristiky na obr. 4.28 lze také odhadnout, že se velikost chyby neodvíjí pouze od velikosti parametru ka . Proto jsou na následujících stranách prozkoumány závislosti na dalších volitelných parametrech výpočtu.

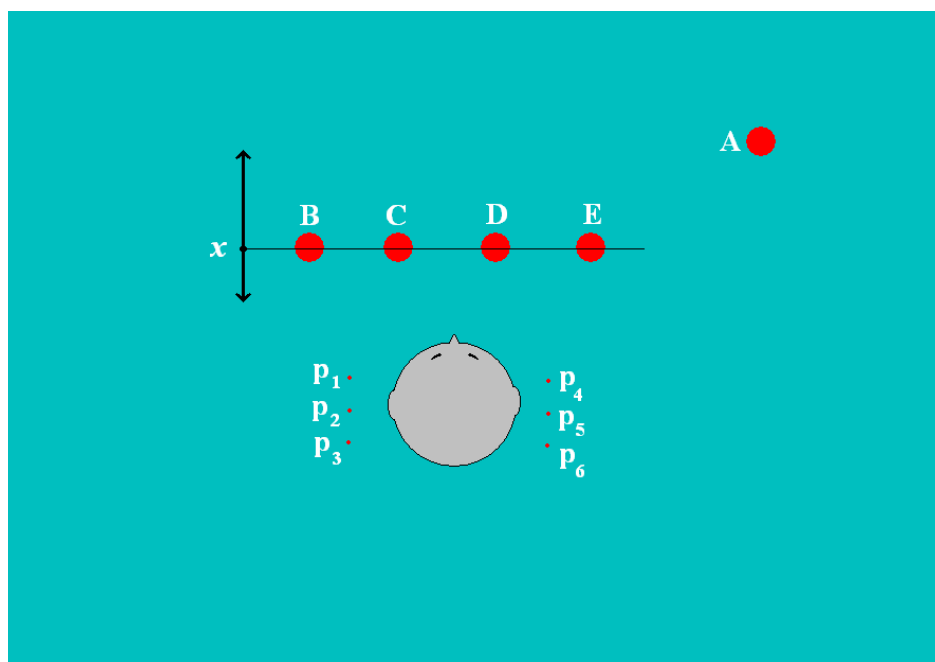
Následující obrázky ukazují, že s rostoucí hodnotou parametru ka se zmenšuje oblast v okolí „uší“, ve které nabývá chybové pole relativně nízkých hodnot. Pro ilustraci je pole vykresleno v jednotkách *SPL* (tato skutečnost nemá na tvar pole vliv).



Obr. 4.29: Závislost tvaru chybového pole na parametru ka pro konfiguraci dle obr. 4.27 [9]

4.5.2 Závislost kvality replikace na vzdálenosti skupiny od sféry

Závislost průměrné relativní chyby replikace na zvolené hodnotě souřadnice x skupiny replikantů je prozkoumána při následující konfiguraci dle obr. 4.30:



Obr. 4.30: Konfigurace úlohy

B, C, D, E.....Replikanti, hodnota souřadnice x se mění, $y = [-0,45 -0,15 0,15 0,45]$,

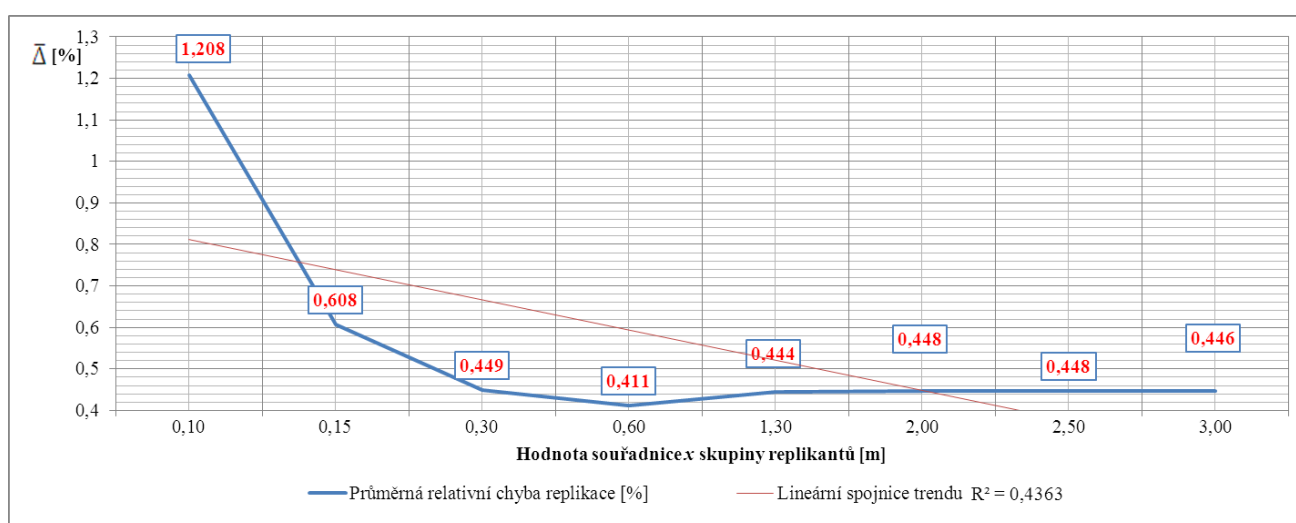
$$z = 0.$$

A.....Zdroj v místě $[1,1,0]$, tvořící originální pole. $ka = 10$.

p_1 až p_6Body zájmu, rozmístěné u bodů, reprezentujících lidské uši.

Tabulka 4.2: Závislost relativní chyby replikace na vzdálenosti skupiny replikantů od sféry

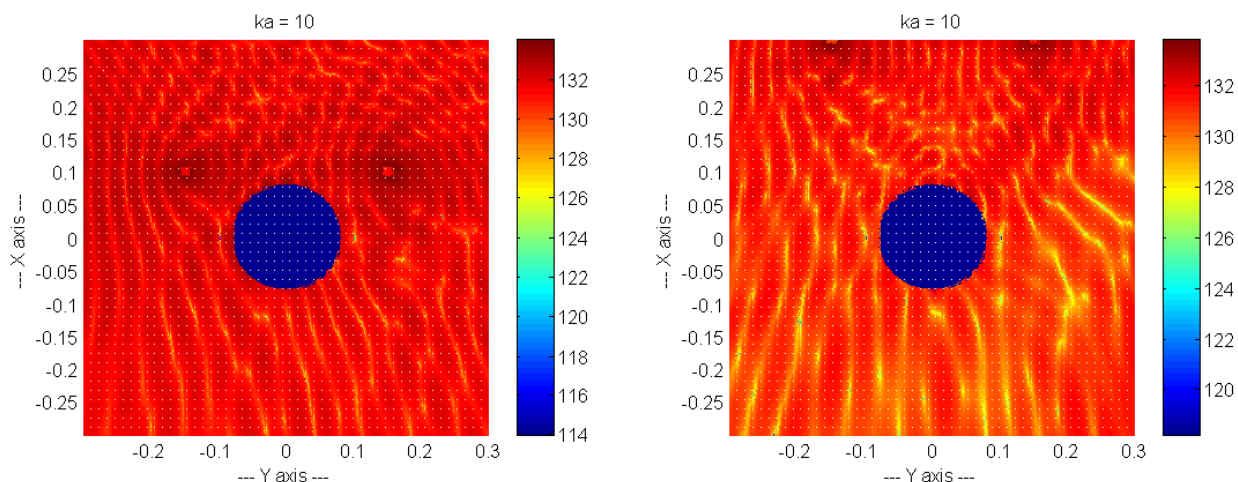
Poloha [x y z]	[0 -0,1 0]	[0 0,1 0]	[0,002 -0,1 0]	[0,002 0,1 0]	[-0,002 -0,1 0]	[-0,002 0,1 0]	
x [m]	Δ_{p1} [%]	Δ_{p2} [%]	Δ_{p3} [%]	Δ_{p4} [%]	Δ_{p5} [%]	Δ_{p6} [%]	$\bar{\Delta}$ [%]
0,10	1,27	1,03	0,13	2,11	2,36	0,35	1,208
0,15	0,14	0,23	0,10	0,77	1,60	0,82	0,608
0,30	0,48	0,99	0,50	0,16	0,36	0,21	0,449
0,60	0,31	0,60	0,30	0,28	0,63	0,35	0,411
1,30	0,41	0,87	0,49	0,27	0,36	0,27	0,444
2,00	0,46	0,95	0,48	0,17	0,39	0,23	0,448
2,50	0,46	0,95	0,49	0,16	0,39	0,22	0,448
3,00	0,47	0,97	0,48	0,16	0,38	0,22	0,446



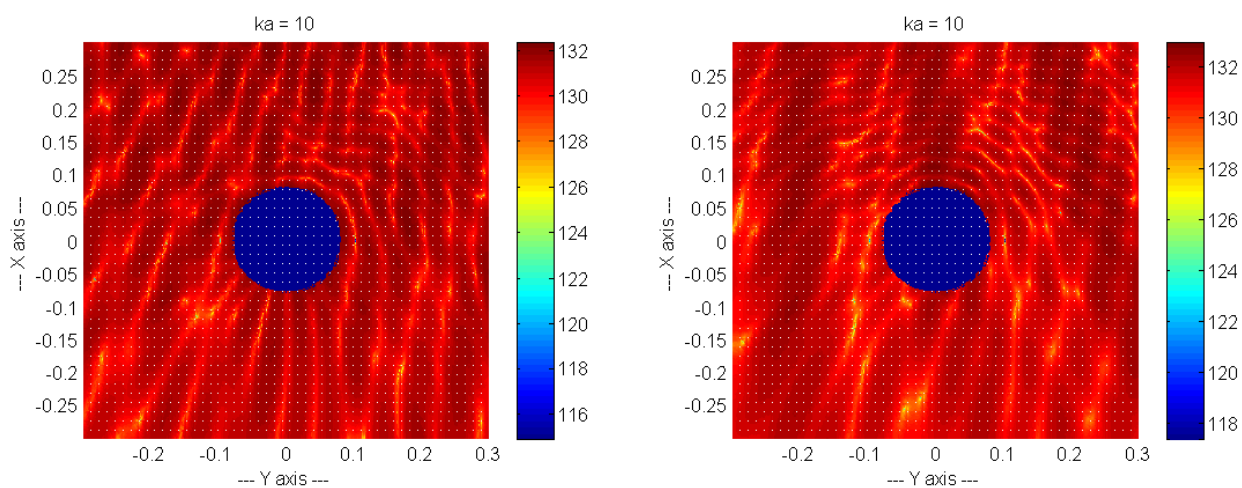
Obr. 4.31: Závislost $\bar{\Delta}$ na vzdálenosti skupiny replikantů od sféry

Z grafu na obr. 4.31 je patrné, že s rostoucí vzdáleností skupiny replikantů od sféry klesá hodnota průměrné relativní chyby replikace. Od určité vzdálenosti se pak již chyba prakticky nemění. Pravděpodobně to bude způsobeno skutečností, že rozptýlená složka celkového tlaku nabývá nejvyšších hodnot v okolí sféry, takže při malých vzdálenostech od zdroje výrazně deformuje jím vytvořené pole, zatímco při vzdálenostech větších deformuje jen jeho menší část.

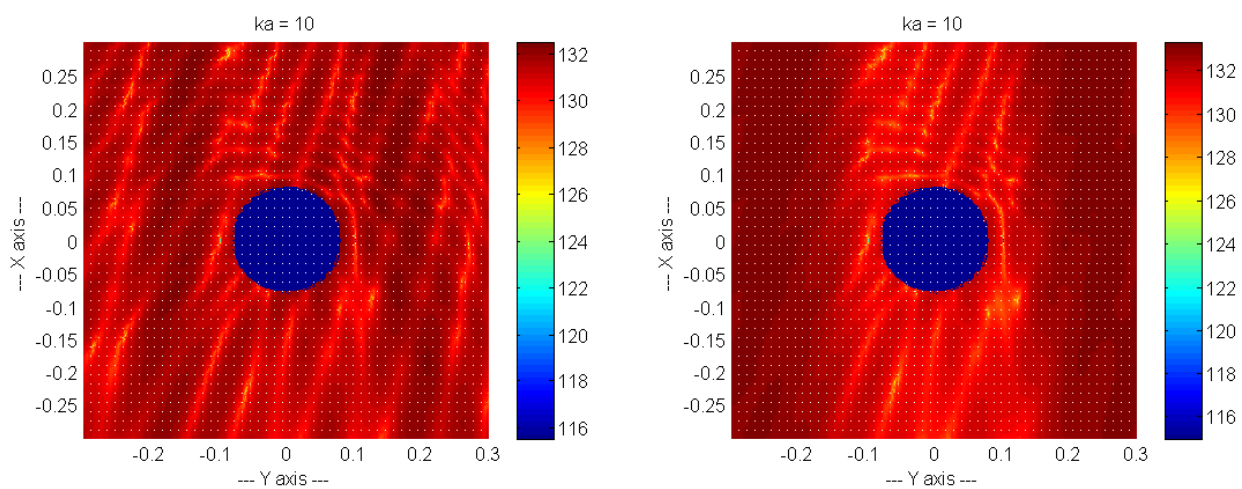
Na následujících obrázcích je vidět, že se při vzdalování skupiny replikantů od sféry tvar oblasti v okolí „uší“, ve které nabývá chybové pole relativně nízkých hodnot, viditelně mění pouze do určité vzdálenosti. Chybové pole je zde vykresleno v jednotkách *SPL*.



Obr. 4.32: Závislost $\bar{\Delta}$ na hodnotě souřadnice x , vlevo: $x = 10 \text{ cm}$, vpravo: $x = 30 \text{ cm}$ [9]



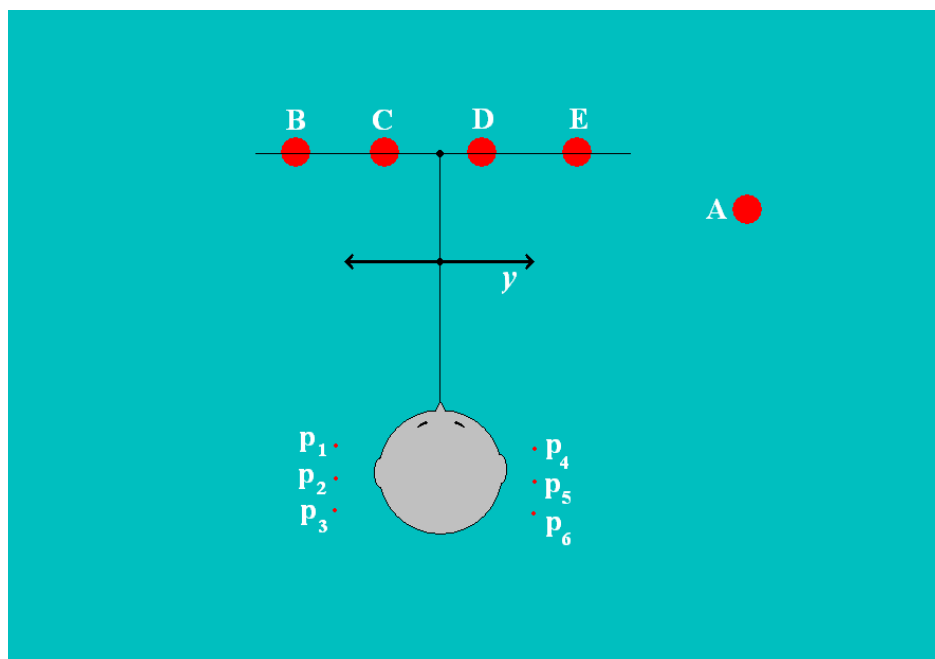
Obr. 4.33: Závislost $\bar{\Delta}$ na hodnotě souřadnice x , vlevo: $x = 60 \text{ cm}$, vpravo: $x = 130 \text{ cm}$ [9]



Obr. 4.34: Závislost $\bar{\Delta}$ na hodnotě souřadnice x , vlevo: $x = 200 \text{ cm}$, vpravo: $x = 300 \text{ cm}$ [9]

4.5.3 Závislost kvality replikace na vzdálenosti skupiny od originálního zdroje

Pro účely demonstrace závislosti průměrné relativní chyby replikace na zvolené hodnotě souřadnice y skupiny replikantů je zvolena konfigurace dle následujícího obrázku. Zvolené konstantní parametry jsou $x = 1,3 \text{ m}$, rozestup mezi jednotlivými replikanty ve směru osy y je $\Delta y = 0,3 \text{ m}$.



Obr. 4.35: Konfigurace úlohy

A.....Zdroj v místě $[1,1,0]$, tvořící originální pole. $ka = 10$.

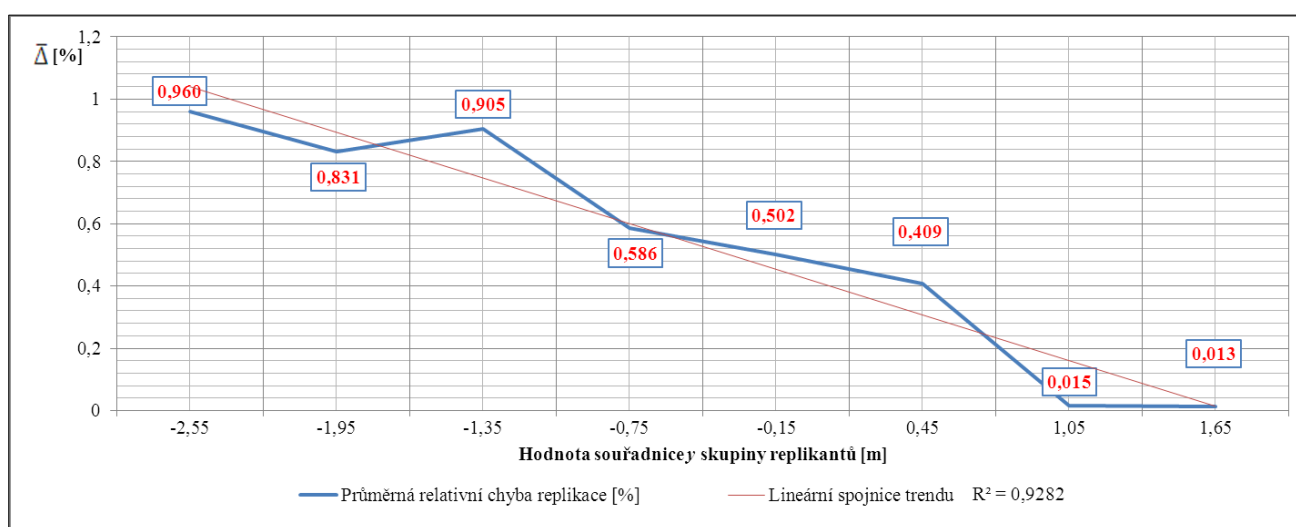
B, C, D, E.....Replikanti, bod $[1,3,y,0]$ udává polohu středu skupiny replikantů.

p_1 až p_6Body zájmu, rozmístěné u bodů, reprezentujících lidské uši.

Závislost kvality replikace na vzdálenosti skupiny od originálního zdroje

Tabulka 4.3: Závislost relativní chyby na vzdálenosti skupiny replikantů od místa původního zdroje

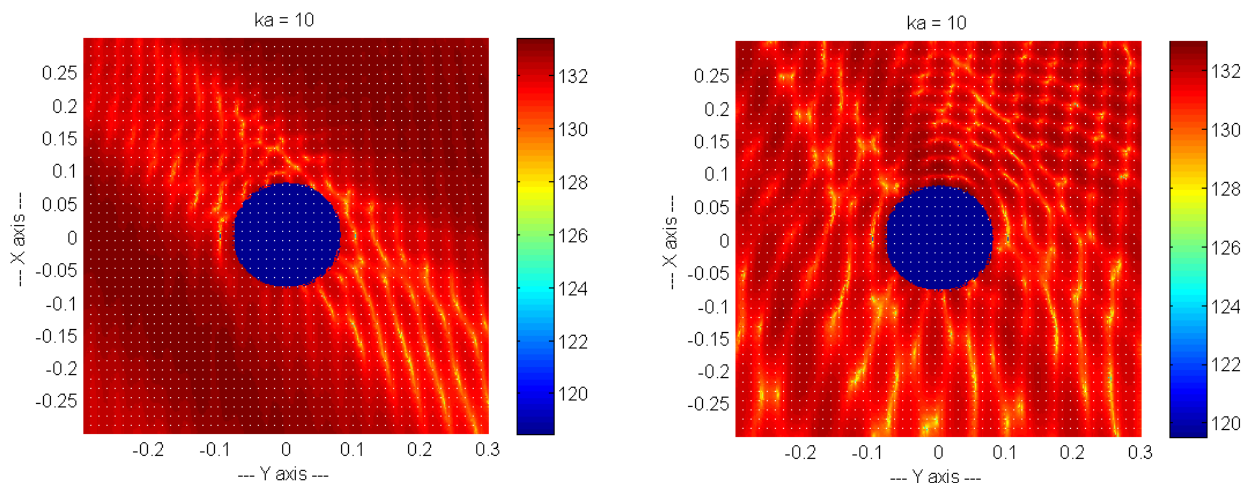
Poloha [x y z]	[0 -0,1 0]	[0 0,1 0]	[0,002 -0,1 0]	[0,002 0,1 0]	[-0,002 -0,1 0]	[-0,002 0,1 0]	
y [m]	Δ_{p1} [%]	Δ_{p2} [%]	Δ_{p3} [%]	Δ_{p4} [%]	Δ_{p5} [%]	Δ_{p6} [%]	$\bar{\Delta}$ [%]
-2,55	0,16	0,06	0,17	1,27	2,66	1,44	0,960
-1,95	0,16	0,43	0,29	0,99	2,05	1,07	0,831
-1,35	0,22	0,45	0,24	0,99	2,25	1,28	0,905
-0,75	0,38	0,82	0,43	0,51	0,95	0,43	0,586
-0,15	0,39	0,82	0,43	0,34	0,69	0,35	0,502
0,45	0,47	0,96	0,48	0,12	0,26	0,17	0,409
1,05	0,01	0,03	0,01	0,01	0,02	0,01	0,015
1,65	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,013



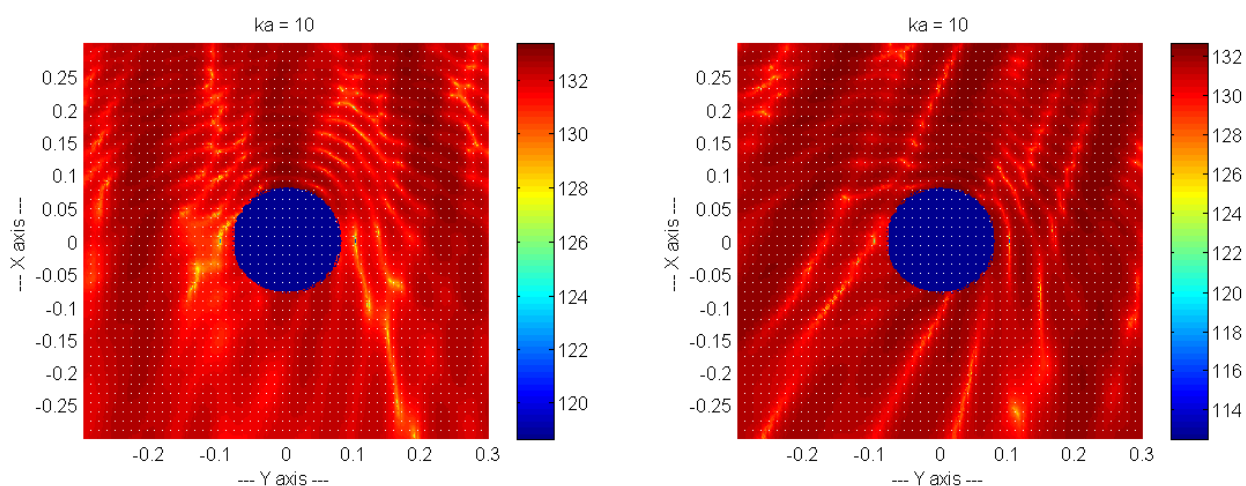
Obr. 4.36: Závislost $\bar{\Delta}$ na vzdálenosti skupiny replikantů od místa původního zdroje

Graf na obr. 4.36 ukazuje, že čím je skupina replikantů blíže místu původního originálního zdroje, tím se snižuje hodnota průměrné relativní chyby replikace. Takovou závislost naznačuje i graf z Obr. 4.31, kdy nejmenší hodnoty průměrné relativní chyby replikace odpovídají situacím, kdy je skupina místu původního zdroje nejbližší.

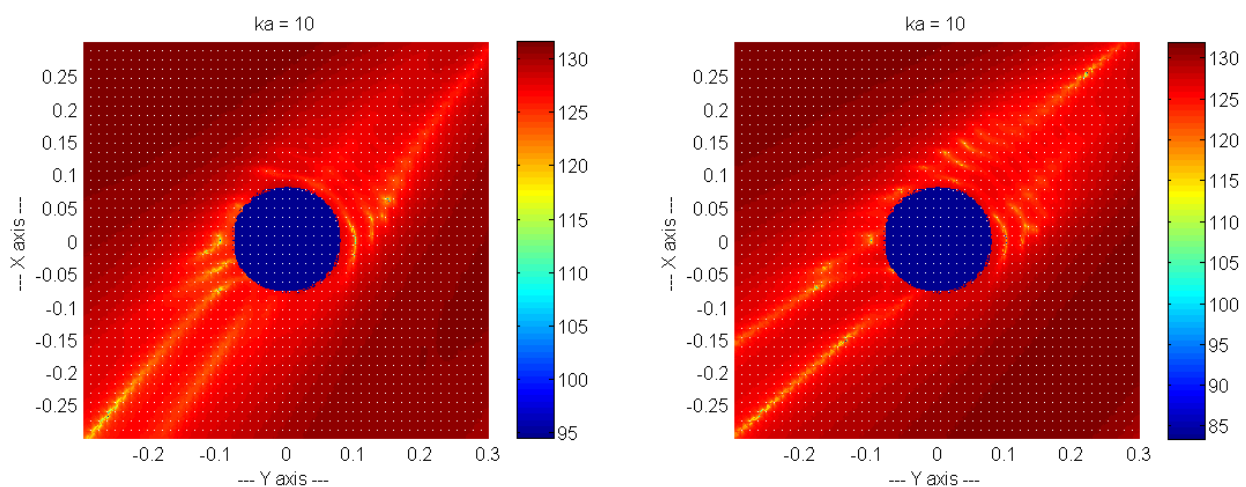
Na následujících obrázcích je patrné, že přibližování skupiny replikantů ke zdroji způsobuje mimo jiné zvětšování oblasti okolo „uší“, kde je hodnota relativní chyby výrazně nižší než v okolí, při současném snižování hodnot prvků matice chybového pole.



Obr. 4.37: Závislost $\bar{\Delta}$ na hodnotě souřadnice y , vlevo: $y = -1,8 \text{ m}$, vpravo: $y = -1,2 \text{ m}$ [9]



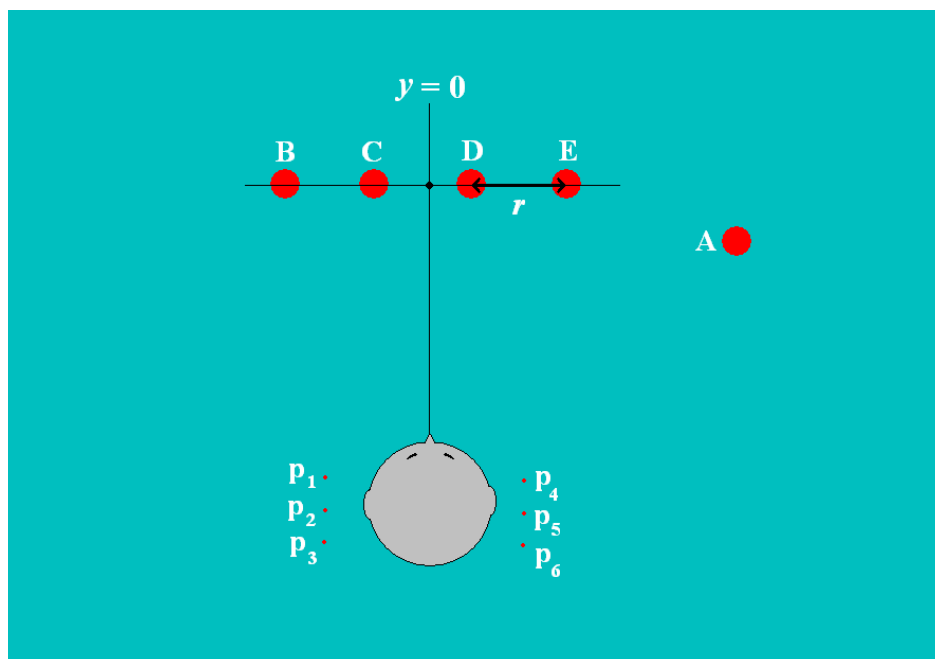
Obr. 4.38: Závislost $\bar{\Delta}$ na hodnotě souřadnice y , vlevo: $y = -0,6 \text{ m}$, vpravo: $y = 0 \text{ m}$ [9]



Obr. 4.39: Závislost $\bar{\Delta}$ na hodnotě souřadnice y , vlevo: $y = 0,6 \text{ m}$, vpravo: $y = 1,2 \text{ m}$ [9]

4.5.4 Závislost kvality replikace na vzdálenosti mezi replikanty

V této části je znázorněna závislost průměrné relativní chyby replikace na zvolené hodnotě rozestupu, ve směru osy y , mezi jednotlivými replikanty ve skupině. Konfigurace úlohy viz. Obr. 4.40. Zvoleným konstantním parametrem je $x = 1,3 \text{ m}$ a $z = 0 \text{ m}$. Skupina replikantů je rozmístěna v řadě s proměnlivým rozestupem, ale vždy symetricky okolo osy y .



Obr. 4.40: Konfigurace úlohy

A.....Zdroj v místě $[1,1,0]$, tvořící originální pole. $ka = 10$.

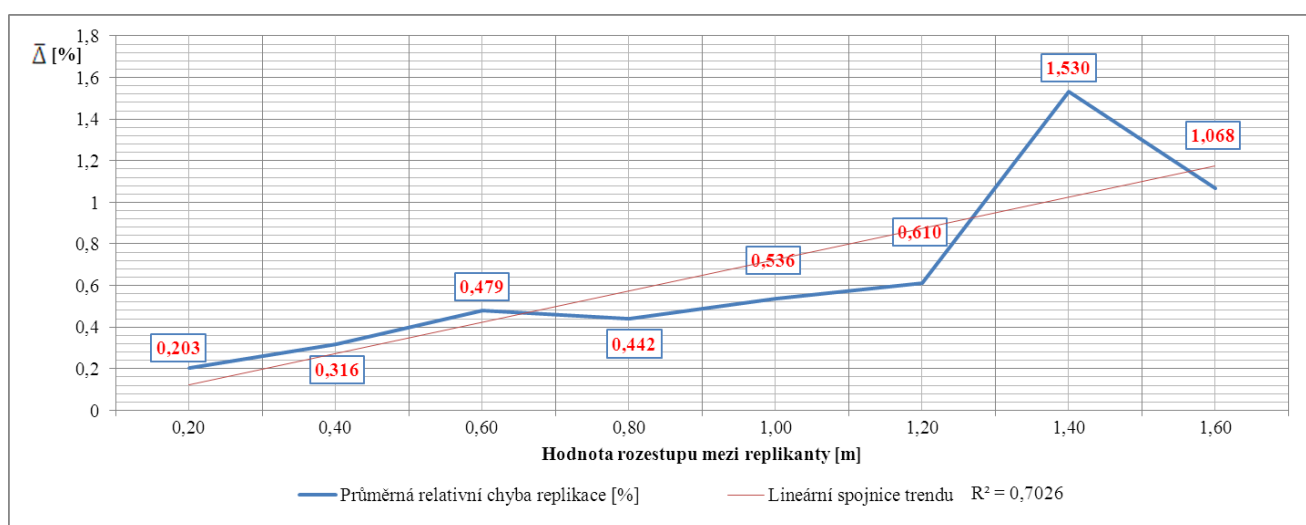
B, C, D, E.....Replikanti s proměnlivým rozestupem ve směru y , vždy symetricky okolo osy y .

p_1 až p_6Body zájmu, rozmístěné u bodů, reprezentujících lidské uši.

Závislost kvality replikace na vzdálenosti mezi replikanty

Tabulka 4.4: Závislost relativní chyby replikace na vzdálenosti mezi replikanty

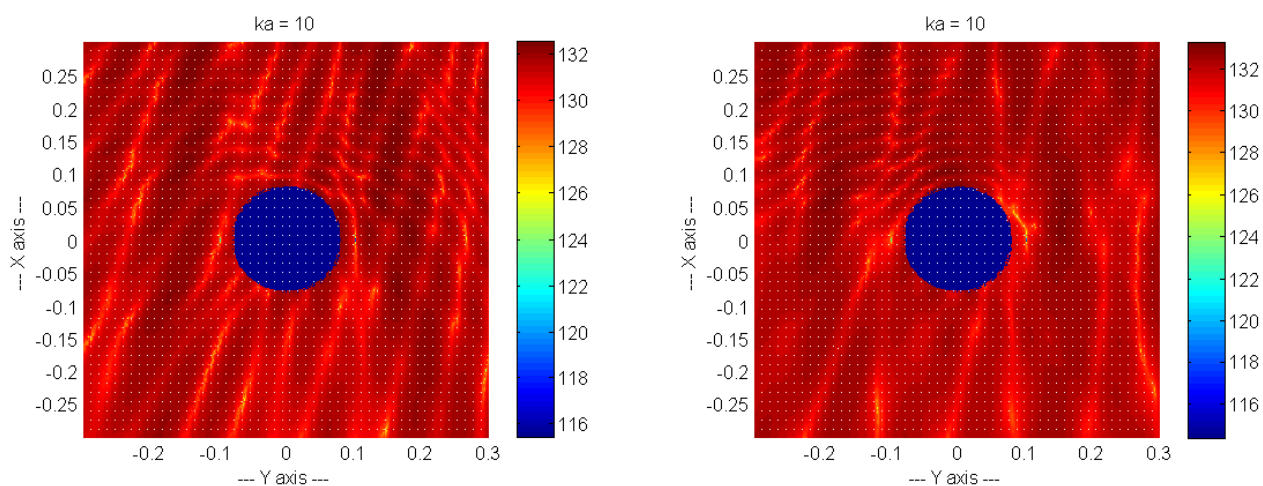
Poloha [x y z]	[0 -0,1 0]	[0 0,1 0]	[0,002 -0,1 0]	[0,002 0,1 0]	[-0,002 -0,1 0]	[-0,002 0,1 0]	
r [m]	Δ_{p1} [%]	Δ_{p2} [%]	Δ_{p3} [%]	Δ_{p4} [%]	Δ_{p5} [%]	Δ_{p6} [%]	$\bar{\Delta}$ [%]
0,20	0,10	0,21	0,11	0,20	0,39	0,20	0,203
0,40	0,19	0,38	0,19	0,27	0,53	0,32	0,316
0,60	0,29	0,62	0,33	0,36	0,81	0,46	0,479
0,80	0,46	0,94	0,48	0,17	0,38	0,22	0,442
1,00	0,61	1,21	0,59	0,25	0,40	0,16	0,536
1,20	0,57	1,20	0,62	0,24	0,63	0,41	0,610
1,40	0,83	1,94	1,01	1,13	2,76	1,52	1,530
1,60	0,75	1,51	0,78	0,75	1,66	0,96	1,068



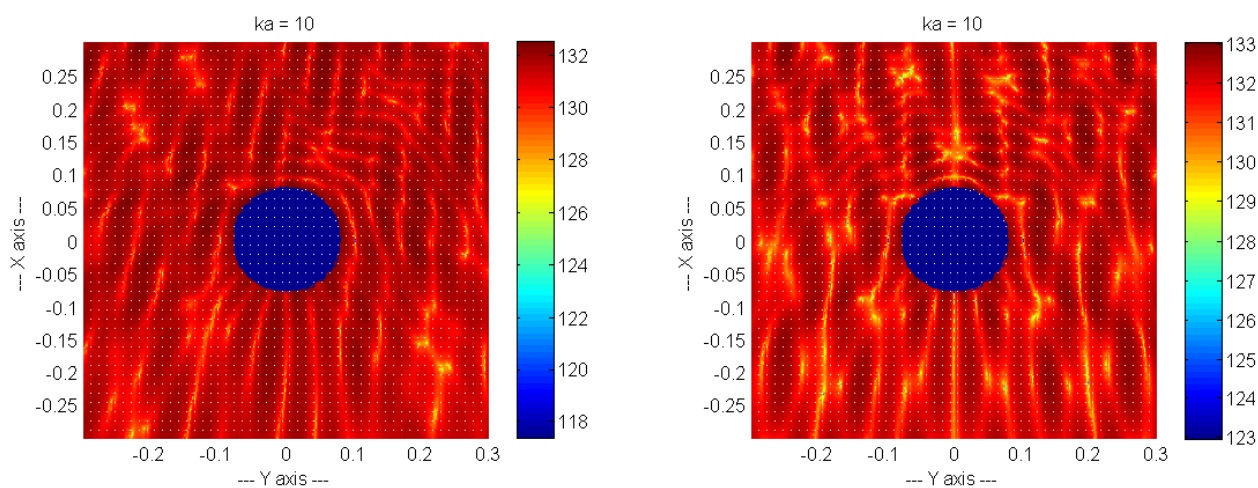
Obr. 4.41: Závislost $\bar{\Delta}$ na vzdálenosti mezi replikanty

Z Obr. 4.41 je zřejmé, že s rostoucím rozestupem mezi replikanty roste i hodnota průměrné relativní chyby replikace. Tato závislost bude pravděpodobně způsobena faktem, že zejména při vyšších kmitočtech jsou jednotlivými replikanty produkovány zvukové vlny o krátkých vlnových délkách a tak je jejich skládání nepřesnější, čím jsou jednotlivé dílčí zdroje vzdálenější.

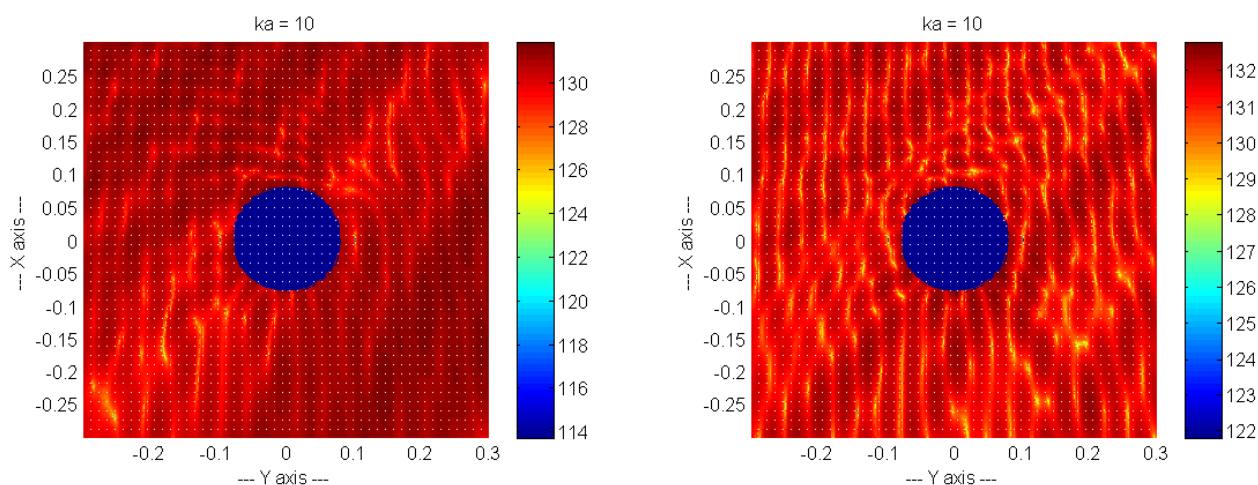
Na následujících obrázcích je vidět, že zvyšování hodnot vzdálenosti mezi jednotlivými replikanty nemá na tvar oblasti okolo „uší“, kde je hodnota relativní chyby výrazně nižší než v okolí, prakticky žádný vliv.



Obr. 4.42: Závislost $\bar{\Delta}$ na velikosti rozestupu r , vlevo: $r = 0,2 \text{ m}$, vpravo: $y = 0,4 \text{ m}$ [9]



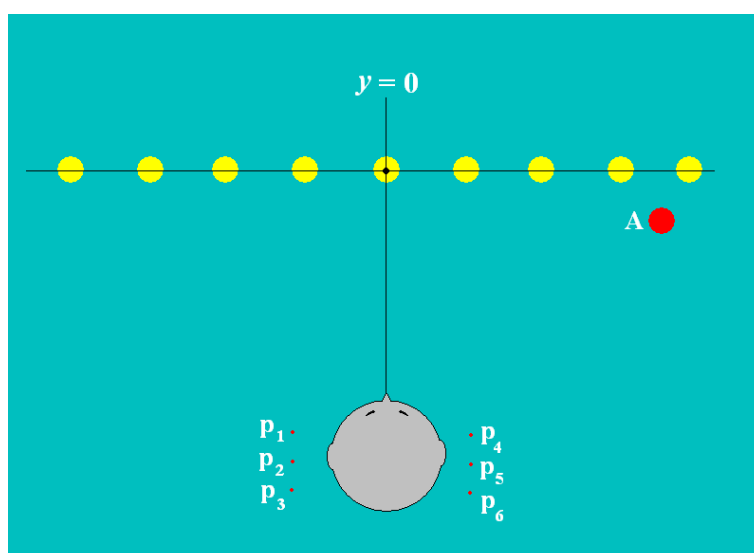
Obr. 4.43: Závislost $\bar{\Delta}$ na velikosti rozestupu r , vlevo: $r = 0,6 \text{ m}$, vpravo: $y = 0,8 \text{ m}$ [9]



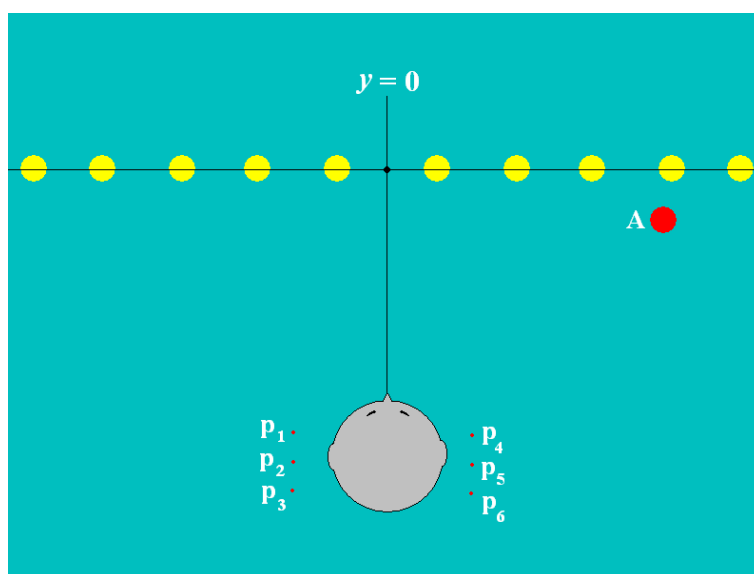
Obr. 4.44: Závislost $\bar{\Delta}$ na velikosti rozestupu r , vlevo: $r = 1 \text{ m}$, vpravo: $y = 1,2 \text{ m}$ [9]

4.5.5 Závislost kvality replikace na počtu replikantů

Počet použitých replikantů je jeden z nejdůležitějších faktorů, ovlivňujících velikost průměrné relativní chyby replikace. Příklad průběhu závislosti chyby na počtu replikantů je uveden níže. K tomuto účelu byla použita konfigurace podobná, jako v předchozím případě. Konstantními parametry jsou $x = 1,3 \text{ m}$ a $z = 0 \text{ m}$ a vzdálenost mezi replikanty, která je rovna $0,3 \text{ m}$. Symetricky okolo osy y je umístěna řada replikantů o proměnlivém počtu. Pro N použitých zdrojů se vždy z dané konfigurace použije N replikantů, které jsou nejbližší ose y . Proto je konfigurace různá pro sudý a lichý počet zdrojů skupiny (viz. Obr. 4.45 a Obr. 4.46).



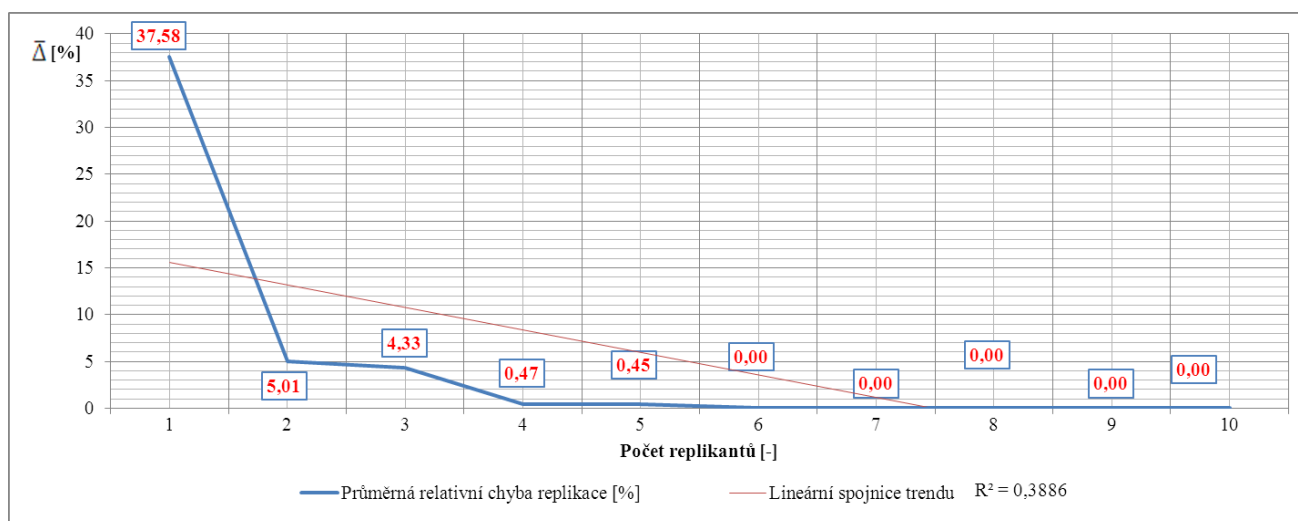
Obr. 4.45: Konfigurace úlohy pro lichý počet replikantů, zdroj A v místě $[1,1,0]$, $k_a = 10$



Obr. 4.46: Konfigurace úlohy pro sudý počet replikantů, zdroj A v místě $[1,1,0]$, $k_a = 10$

Tabulka 4.5: Závislost relativní chyby replikace na počtu replikantů

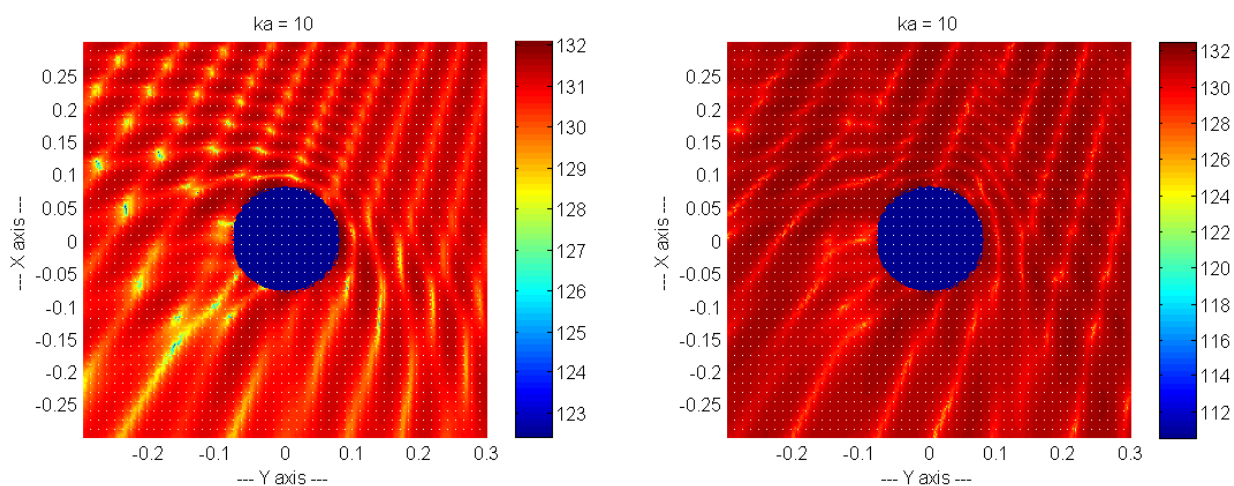
Poloha [x y z]	[0 -0,1 0]	[0 0,1 0]	[0,002 -0,1 0]	[0,002 0,1 0]	[-0,002 -0,1 0]	[-0,002 0,1 0]	
Počet replikantů	Δ_{p1} [%]	Δ_{p2} [%]	Δ_{p3} [%]	Δ_{p4} [%]	Δ_{p5} [%]	Δ_{p6} [%]	$\bar{\Delta}$ [%]
1	27,48	30,10	33,45	35,43	44,53	54,48	37,58
2	7,76	0,71	7,95	6,76	0,02	6,84	5,01
3	4,96	0,61	5,25	7,06	0,18	7,91	4,33
4	0,41	0,87	0,45	0,27	0,54	0,27	0,47
5	0,28	0,55	0,27	0,37	0,80	0,42	0,45
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



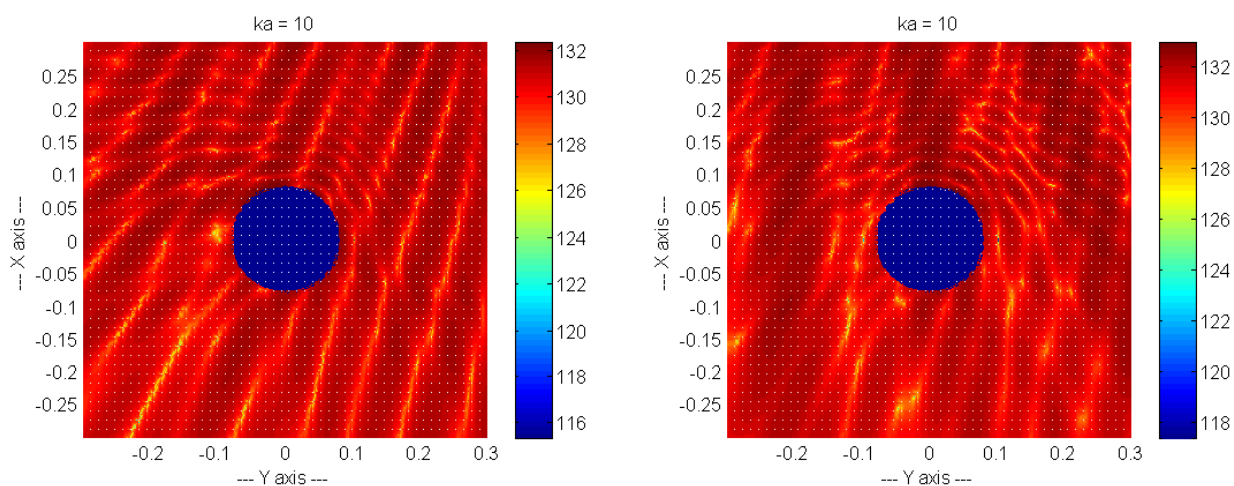
Obr. 4.47: Závislost $\bar{\Delta}$ na počtu replikantů

Graf na obr. 4.47 ukazuje, že pokud je počet replikantů shodný, nebo vyšší, než počet bodů zájmu, hodnota průměrné relativní chyby replikace je mnohem nižší, než 1 %. Z obrázku je také patrné, že s rostoucím počtem replikantů obecně klesá průměrná relativní chyba replikace.

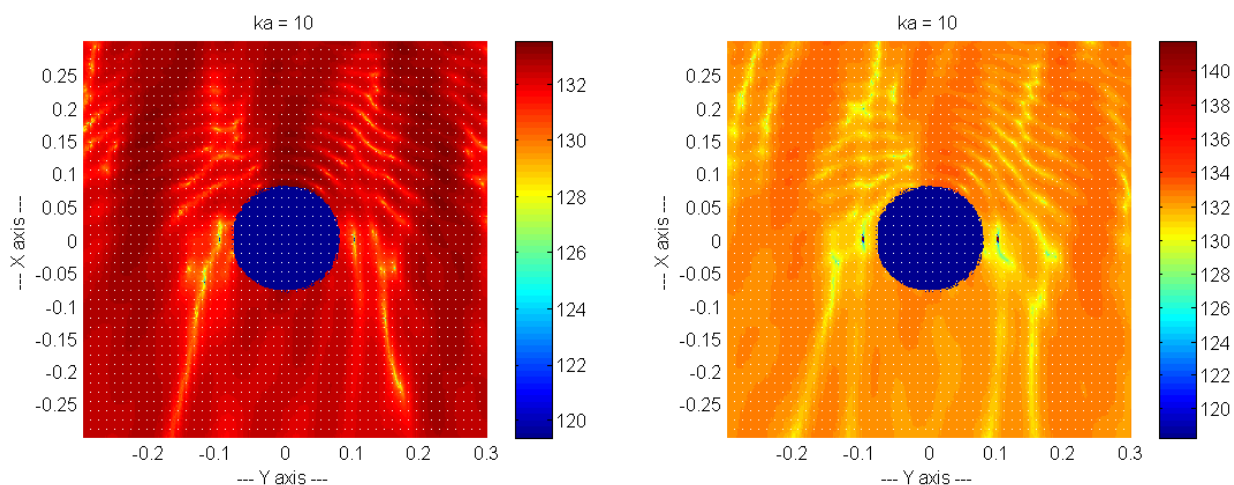
Z následujících obrázků je vidět, že zvyšování počtu replikantů má na tvar a velikost oblasti okolo „uší“, kde je hodnota relativní chyby výrazně nižší než v okolí, velký vliv dokud se tento počet nerovná počtu bodů zájmu. Při dalším zvyšování počtu replikantů se pak oblast mění mnohem méně.



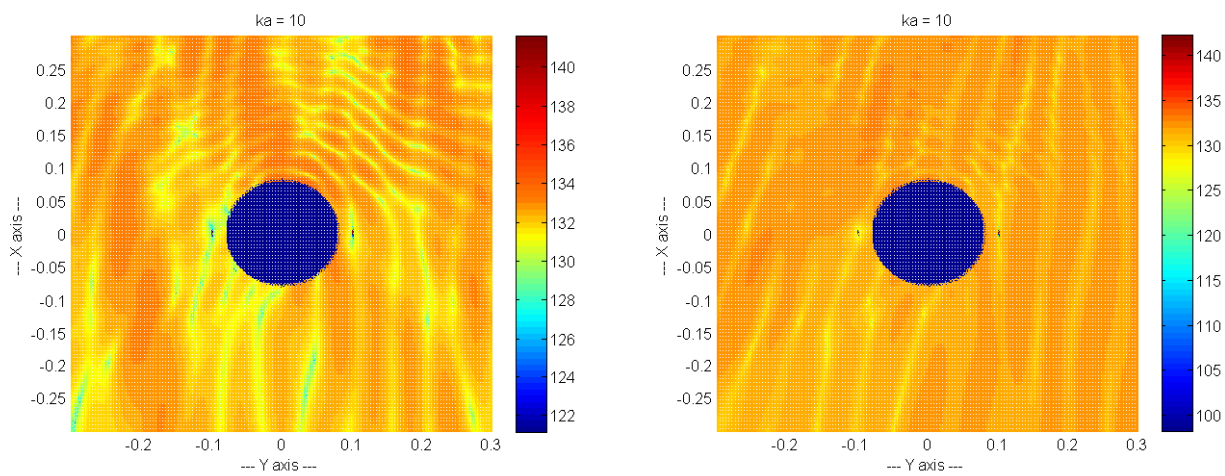
Obr. 4.48: Závislost $\bar{\Delta}$ na počtu replikantů N , vlevo: $N = 1$, vpravo: $N = 2$ [9]



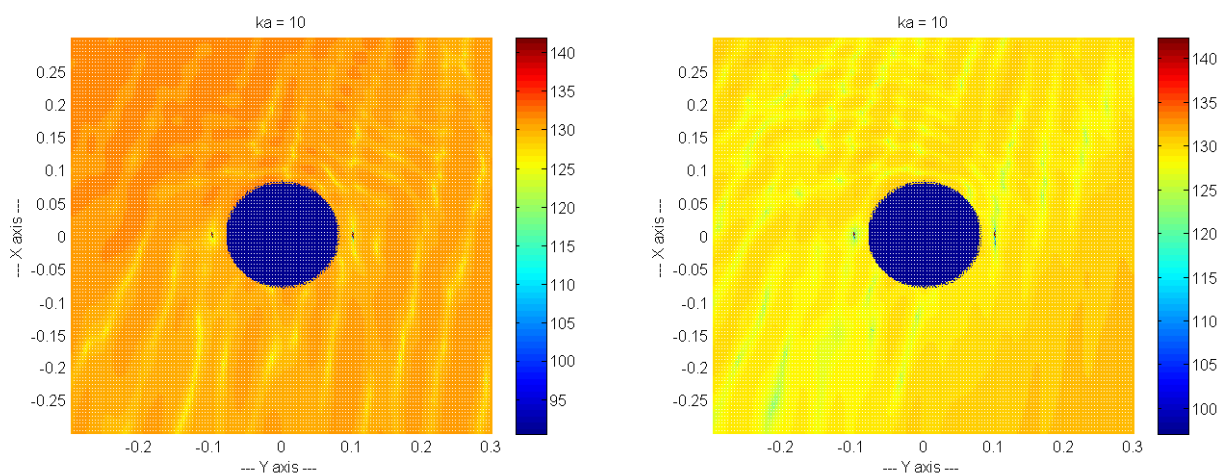
Obr. 4.49: Závislost $\bar{\Delta}$ na počtu replikantů N , vlevo: $N = 3$, vpravo: $N = 4$ [9]



Obr. 4.50: Závislost $\bar{\Delta}$ na počtu replikantů N , vlevo: $N = 5$, vpravo: $N = 6$ [9]



Obr. 4.51: Závislost $\bar{\Delta}$ na počtu replikantů N , vlevo: $N = 7$, vpravo: $N = 8$ [9]

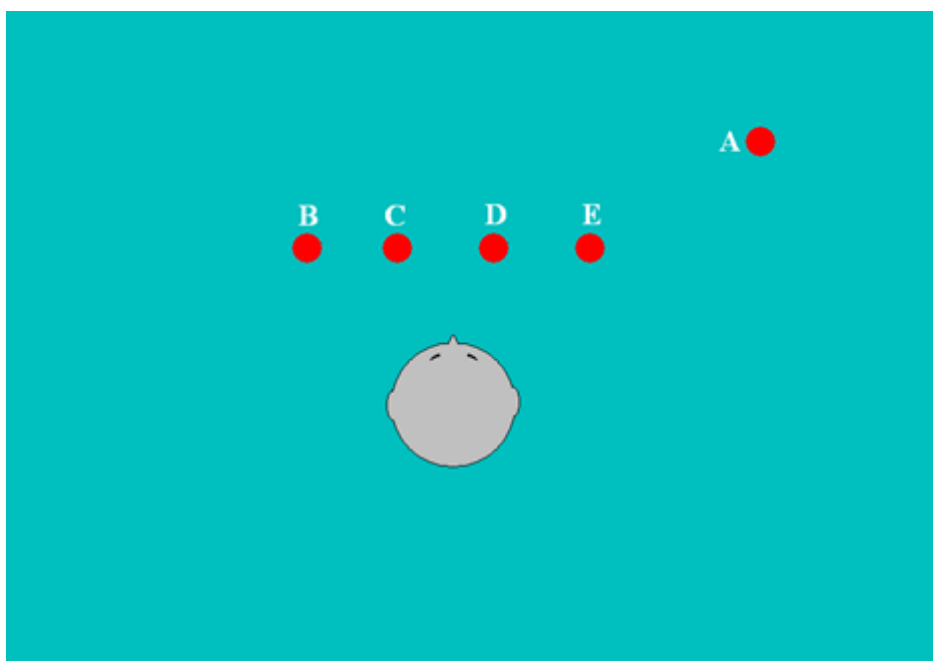


Obr. 4.52: Závislost $\bar{\Delta}$ na počtu replikantů N , vlevo: $N = 9$, vpravo: $N = 10$ [9]

4.5.6 Závislost kvality replikace na počtu bodů zájmu

Pro demonstraci závěru z předchozí úlohy je v této části práce prozkoumána závislost kvality replikace na počtu bodů zájmu a to pro konfiguraci úlohy z Obr. 4.53.

Konstantními parametry jsou $x = 1,3 \text{ m}$ a $z = 0 \text{ m}$ a vzdálenost mezi replikanty ve směru osy y , která je rovna $0,3 \text{ m}$. Body zájmu jsou postupně přidávány k bodům, reprezentujícím lidské uši (viz. Tabulka 4.6).



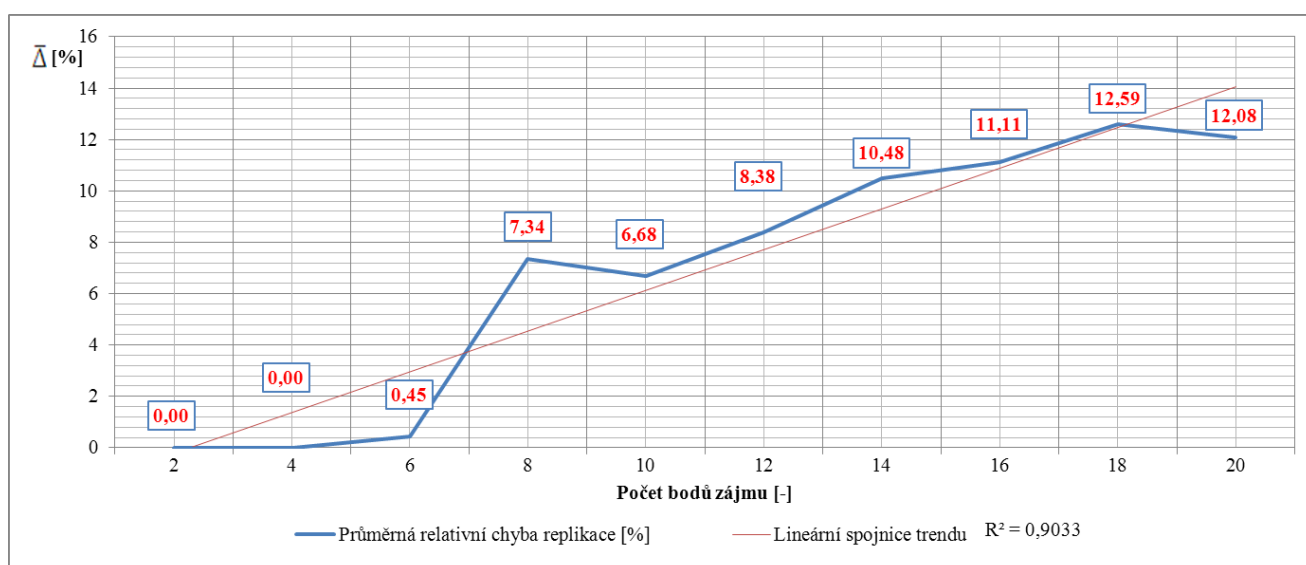
Obr. 4.53: Konfigurace úlohy

A.....Zdroj v místě $[1,1,0]$, tvořící originální pole. $ka = 10$.

B, C, D, E.....Replikanti, $x = 1,3 \text{ m}$, $y = [-0,45 -0,15 0,15 0,45]$, $z = 0$.

Tabulka 4.6: Závislost relativní chyby replikace na počtu bodů zájmu

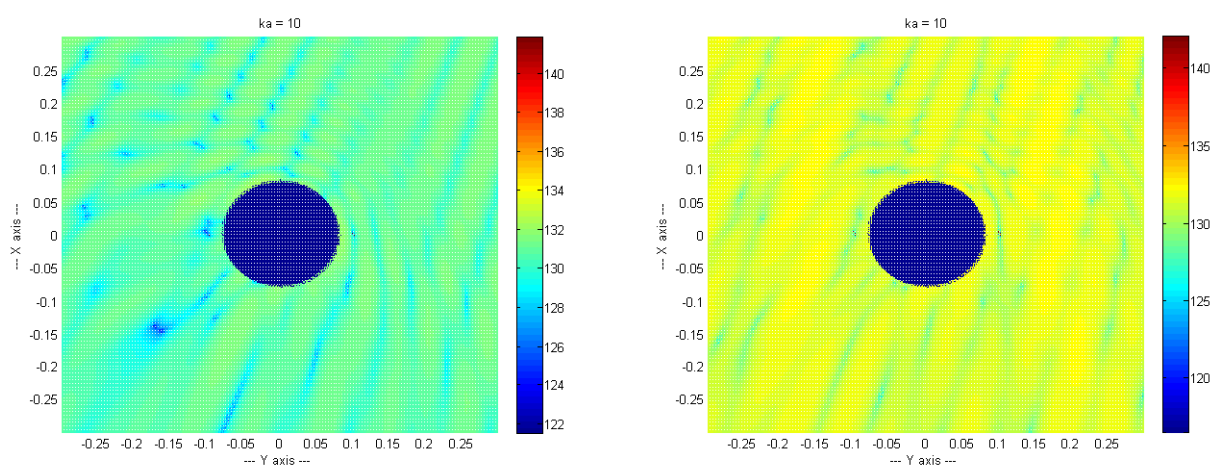
Poloha (z = 0)												
x [m]	y [m]	Počet bodů zájmu	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
0	-0,1	Δ_{p1} [%]	0,00	0,00	0,95	0,66	0,67	1,05	1,42	2,12	3,05	3,32
0	0,1	Δ_{p2} [%]	0,00	0,00	0,40	3,56	3,87	8,00	9,08	9,50	13,80	15,01
0,002	-0,1	Δ_{p3} [%]		0,00	0,46	5,80	5,61	6,27	3,92	6,64	7,57	7,53
0,002	0,1	Δ_{p4} [%]		0,00	0,17	18,51	18,61	21,77	15,27	19,10	21,76	22,89
-0,002	-0,1	Δ_{p5} [%]			0,48	5,11	4,80	4,82	7,43	3,21	2,64	2,34
-0,002	0,1	Δ_{p6} [%]			0,23	14,54	13,34	12,28	18,31	9,71	12,95	11,64
0	-0,102	Δ_{p7} [%]				1,50	3,50	1,26	2,08	3,75	3,66	4,46
0	0,102	Δ_{p8} [%]				9,02	10,73	6,64	11,54	13,51	12,19	12,73
0,002	-0,102	Δ_{p9} [%]					1,84	4,86	4,89	3,03	5,56	3,92
0,002	0,102	Δ_{p10} [%]					3,80	8,98	9,95	9,34	12,34	8,60
-0,002	-0,102	Δ_{p11} [%]						6,67	7,20	7,92	6,01	7,51
-0,002	0,102	Δ_{p12} [%]						18,02	20,41	21,41	17,64	19,73
0,004	-0,1	Δ_{p13} [%]							8,05	10,03	10,76	10,48
0,004	0,1	Δ_{p14} [%]							27,15	29,71	31,24	31,54
-0,004	-0,1	Δ_{p15} [%]								8,89	8,68	8,03
-0,004	0,1	Δ_{p16} [%]								19,94	20,87	16,61
-0,004	-0,102	Δ_{p17} [%]									10,68	11,59
-0,004	0,102	Δ_{p18} [%]									25,31	27,42
0,004	-0,102	Δ_{p19} [%]										5,25
0,004	0,102	Δ_{p20} [%]										11,00
		$\bar{\Delta}$ [%]	0,00	0,00	0,45	7,34	6,68	8,38	10,48	11,11	12,59	12,08



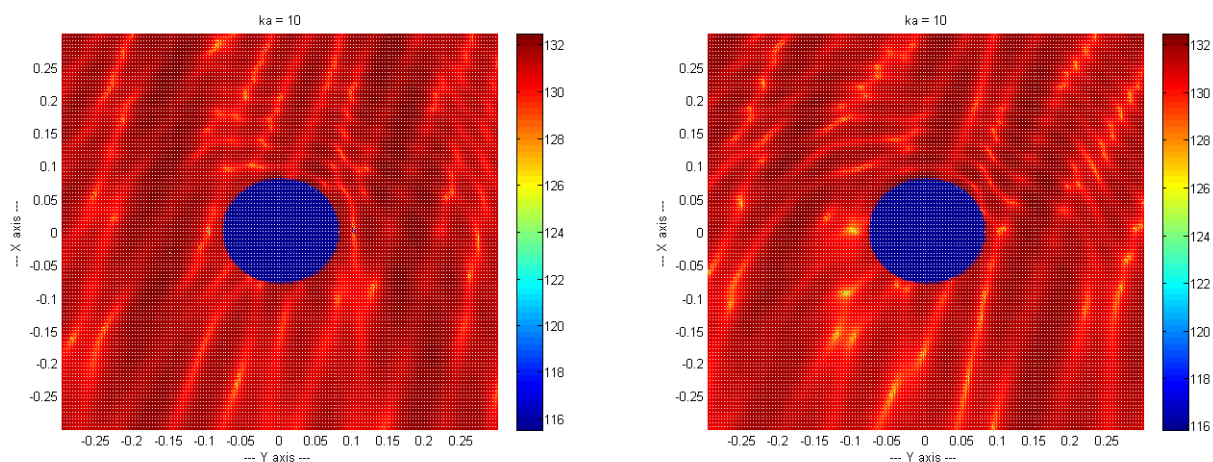
Obr. 4.54: Závislost $\bar{\Delta}$ na počtu bodů zájmu

Z grafu na obr. 4.54 je patrné, že s rostoucím počtem bodů zájmu n roste i hodnota průměrné relativní chyby replikace. Pro počet bodů vyšší než počet replikantů pak hodnota chyby roste mnohem rychleji, než pro počet srovnatelný, či nižší, než je množství replikantů. To potvrzuje závěr z předchozí úlohy.

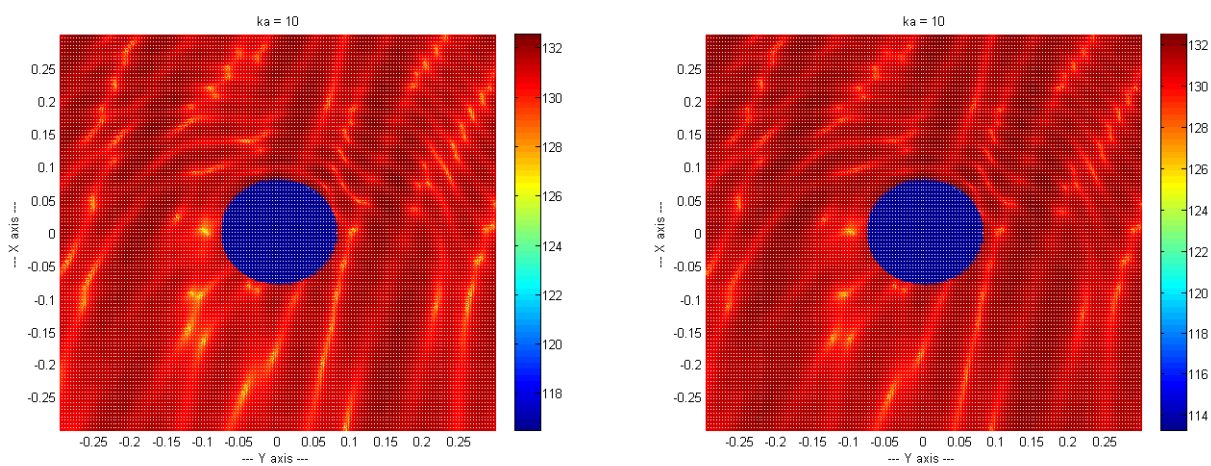
Z následujících obrázků je pak vidět celkové zmenšování velikosti oblasti okolo „uší“, kde je hodnota relativní chyby výrazně nižší než v okolí, při současném zvyšování hodnot prvků matice chybového pole, pro rostoucí počet bodů zájmu.



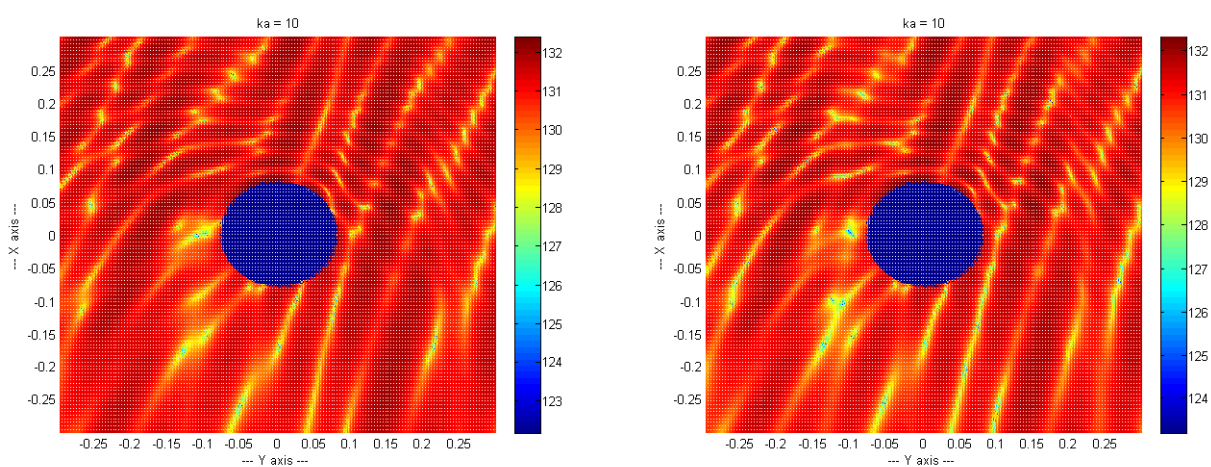
Obr. 4.55: Závislost $\bar{\Delta}$ na počtu bodů zájmu n , vlevo: $n = 2$, vpravo: $n = 4$ [9]



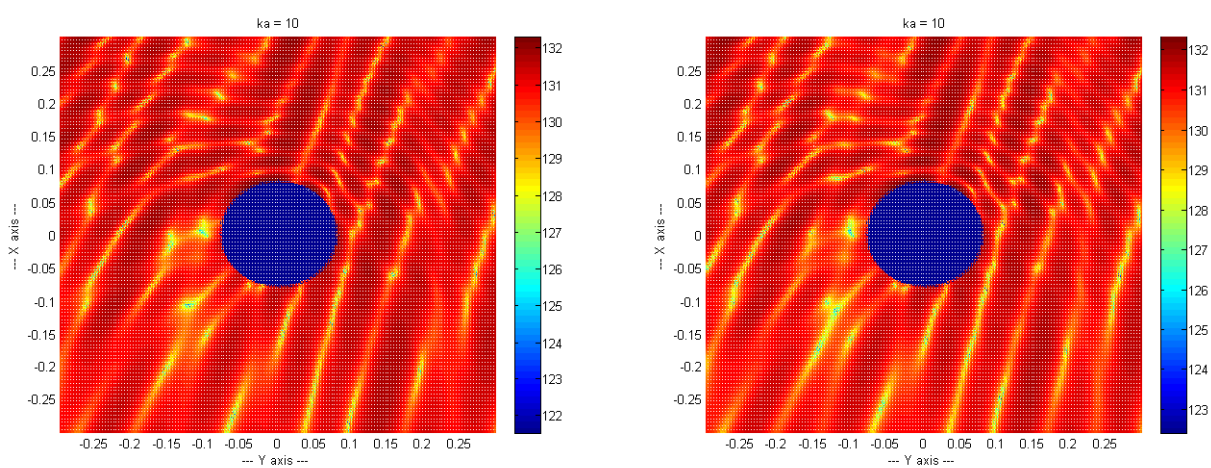
Obr. 4.56: Závislost $\bar{\Delta}$ na počtu bodů zájmu n , vlevo: $n = 6$, vpravo: $n = 8$ [9]



Obr. 4.57: Závislost $\bar{\Delta}$ na počtu bodů zájmu n , vlevo: $n = 10$, vpravo: $n = 12$ [9]



Obr. 4.58: Závislost $\bar{\Delta}$ na počtu bodů zájmu n , vlevo: $n = 14$, vpravo: $n = 16$ [9]



Obr. 4.59: Závislost $\bar{\Delta}$ na počtu bodů zájmu n , vlevo: $n = 18$, vpravo: $n = 20$ [9]

5 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo modelovat zvukové pole, které je deformované přítomností tuhé sféry. Po ověření teoretických předpokladů směrovými charakteristikami a charakteristikami frekvenční odezvy byla vytvořena grafická prostředí pro jejich vykreslování a ukládání výsledků.

V dalším kroku byl napsán program pro výpočet, uložení a zobrazení zvukového pole v prostoru 3x3 metry. I zde je zvukové pole ovlivněno sférou. V příslušném grafickém prostředí je pak možno jednotlivé zdroje kombinovat, přidávat a ukládat výsledky takto vzniklých polí ve formě *.mat*, *.fig* a *.jpg*.

V závěru práce je popsán postup syntézy libovolného zvukového pole libovolnými zdroji v předem definovatelných bodech, pomocí grafického prostředí *synt.fig*. Pro zjištění míry kvality syntézy je zde pak vykresleno i tzv. „chybové pole“ a spočteny hodnoty relativní chyby replikace v tzv. „bodech zájmu“.

V závěru práce je zkoumána závislost kvality replikace na parametru ka , na vzdálenosti skupiny replikantů od sféry, na vzdálenosti této skupiny od místa původního zdroje, na vzájemné vzdálenosti mezi jednotlivými replikanty, na počtu replikantů ve skupině a na počtu bodů zájmu.

Z výsledků vyplývá, že replikace je obecně kvalitnější, čím je hodnota ka nižší. Vzdálenost replikantů od sféry má na kvalitu replikace zásadní vliv pouze do určité vzdálenosti, kdy koule v blízkosti replikanta rozptyluje většinou část jím vytvořené energie zpět do prostoru. Při větších vzdálenostech pak dochází k ovlivnění menšímu až prakticky stejnému jako u originálního zdroje a chyba replikace tak téměř není funkcí vzdálenosti od sféry. Čím je skupina blíže místu původního zdroje, tím je replikace obecně kvalitnější a tedy s menší mírou chyby. Zvyšující se rozestup mezi replikanty pak působí na kvalitu syntézy nepříznivě, stejně jako rostoucí počet bodů zájmu.

Pro kvalitní replikaci je velmi vhodné, použít alespoň tolik replikantů, kolik je v úloze zvolených bodů zájmu. Počet replikantů je totiž při syntéze ten faktor, který kvalitu replikace ovlivňuje nejvíce.

Dalším cílem by pro následující verze programu mělo být automatické rozhodování o nejvhodnějším počtu a poloze replikujících zdrojů na základě hledání minima hodnoty relativní chyby replikace, či nahrazení tuhé sféry přesnějším modelem lidské hlavy.

6 ZDROJE

6.1 Literatura

- [1] ŠKVOR, Z.: Akustika a elektroakustika. 1. vyd. Praha; Vydavatelství Academia; 2001. 527 stran. ISBN 80-200-0461-0
- [2] Spherical Wave Scattering by a Rigid Sphere. [.pdf]
URL: http://ansol.us/products/Coustyx/validation/MultiDomain/Scattering/SphericalWave/HardSphere/Downloads/dataset_description.pdf [19.10.2013]
- [3] KUTTRUFF, H.: Acoustics: an introduction. 1. vyd. New York; Taylor & Francis; 2007. 457 stran. ISBN 978-0-415-38679-1
- [4] Definice. Sférické souřadnice (v R^3). [.pdf]
URL: <http://math.feld.cvut.cz/tkadlec/ftp/vyuka/ma2.pdf> [4.11.2013]
- [5] Audio Systems for DTV, ITU Seminar Kiev, Tony Spath, Dolby Laboratories, England, Nov. 14, 2000
URL: http://www.itu.int/ITU-D/tech/events/2002_2000/kiev2000/Presentations/spath/Dolby%20Kiev%20ITU.pdf [22.10.2013]

6.2 Ostatní zdroje

- [6] 5-1-surround-sound. [.svg]
URL: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d7/5-1-surround-sound.svg> [22.9.2013]
- [7] Spherical coordinate system
URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Spherical_coordinate_system [4.11.2013]
- [8] HUSNÍK, L.: RESTITUTION DE CHAMPS - CABINE D'ÉCOUTE,
Projet de Philippe Herzog, LMA Marseille, ČVUT v Praze, [Přednáška] [4.5.2013]

6.3 Použitý software

[9] MATLAB. Verze 7.12.0.635 (R2011a), 32-bit, Školní Licence

6.4 Obsah přiloženého CD

- 1) Syntéza směrového zvukového pole v poslechové místnosti.rar (programy)
- 2) Syntéza směrového zvukového pole v poslechové místnosti.docx
- 3) Syntéza směrového zvukového pole v poslechové místnosti.pdf