



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

SIMULACE POHYBU ZDROJE ZVUKU PRO VÍCEKANÁLOVOU REPRODUKTOROVOU TOPOLOGII

SIMULATION OF SOUND SOURCE MOTION FOR MULTICHANNEL SPEAKER TOPOLOGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PETR DVOŘÁK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. KRISTIÁN ORLOVSKÝ

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Petr Dvořák

ID: 106419

Ročník: 2

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Simulace pohybu zdroje zvuku pro vícekanálovou reproduktorovou topologii

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte metody panoramování pohybujícího se zdroje zvuku ve volném poli (neuvažujeme odrazy od překážek) a tyto metody porovnejte. Metody nasimulujte v prostředí Matlab pro volitelný počet reproduktorů. V simulaci bude možné volit trajektorii pohybu zdroje zvuku, rychlost jeho pohybu a taky parametry segmentování zdrojového zvukového signálu. Výsledkem bude aplikace v prostředí Matlab, včetně uživatelského rozhraní (GUI).

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Chowning J. M., The Simulation of Moving Sound Sources, Computer Music Journal, Vol. 1, No. 3. (Jun., 1977), pp. 48-52.

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 24.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Kristián Orlovský

Konzultanti diplomové práce:

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato práce popisuje simulaci pohybu virtuálního zdroje zvuku v prostoru s více reproduktory. Zabývá se zejména studiem a následnou implementací jevů nutných k simulaci pohybu virtuálního zdroje zvuku. Teoretická část práce se tedy zabývá uvedením a následným popisem těchto jevů. Jedná se zejména o popis panoramování zvuku a popis Dopplerova jevu. V následné praktické části práce jsou již popsány jevy aplikovány v programovém prostředí Matlab. Ve vytvořeném rozhraní je poté možné volit parametry simulace jako trajektorie pohybu virtuálního zdroje zvuku, počet bodů trajektorie atd. Pro zvolené referenční nastavení simulace jsou poté provedeny analýzy vzniklého signálu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Panoramování, Dopplerův jev, simulace pohybu, virtuální zdroj zvuku, interpolace, okénková funkce

ABSTRACT

This paper describes the simulation of the motion of a sound source in space with several speakers. It deals mainly with the study and subsequent implementation of events necessary for simulating the motion of the virtual sound source. The theoretical part is therefore concerned with finding these phenomena and with their description. Mainly that means description of panning of the sound and of the Doppler effect. In the following practical part of the work, the previously described phenomena are applied into Matlab. In the created interface, it is then possible to select the parameters of the simulation, such as the trajectory of the motion of the virtual sound source, the number of the points of the trajectory, etc. Analyses of the generated signal are then made of the selected referential parameters of the simulation.

KEYWORDS

Panning, Doppler effect, simulation of move, virtual source of sound, interpolation, window function

DVOŘÁK, P. *Simulace pohybu zdroje zvuku pro vícekanálovou reproduktorovou topologii*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací, 2012. 63 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Kristián Orlovský.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Simulace pohybu zdroje zvuku pro vícekanálovou reproduktorovou topologii jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Kristiánu Orlovskému za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	vi
ÚVOD	1
1 SLUCHOVÉ VNÍMÁNÍ ZVUKU V PROSTORU	2
1.1 Interaurální časová diference	3
1.2 Interaurální intenzitní diference.....	4
1.3 Spektrální zbarvení zvuku.....	5
2 PANORAMOVÁNÍ STATICKEHO ZDROJE ZVUKU	6
2.1 Vektorově bázové amplitudové panoramování	7
2.1.1 Trigonometrická metoda.....	8
2.1.2 Metoda vektorové základny.....	8
2.1.3 Metoda vektorové základny pro více než 2 reproduktory	10
3 PANORAMOVÁNÍ POHYBUJÍCÍHO SE ZDROJE ZVUKU	12
3.1 Lokalizační prvky	12
3.2 Dopplerův jev	12
3.3 Simulace daných podnětů	14
4 SIMULACE POHYBUJÍCÍHO SE ZDROJE ZVUKU	18
4.1 Popis rozhraní vytvořeného programu.....	18
4.1.1 Popis prostředí	18
4.1.2 Popis hlavního algoritmu	24
4.2 Analýza vytvořené simulace	26
4.2.1 Typ přechodové funkce	26
4.2.2 Velikost prolnutí dané přechodové funkce	30

4.2.3	Nastavení koeficientů přechodové funkce	34
4.2.4	Vliv počtu interpolovaných bodů na 1 metr na plynulost pohybu virtuálního zdroje zvuku v prostoru.....	37
4.2.5	Analýza vlivu rychlosti pohybu virtuálního zdroje zvuku na plynulost pohybu tohoto zdroje zvuku	42
4.2.6	Subjektivní vjem trajektorie signálu	45
5	ZÁVĚR	48
	Literatura	50
	Seznam použitých zkratk	52
	Seznam příloh	53

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Zdroj zvuku v prostoru pro a) $\alpha = 0^\circ$ a b) $\alpha \neq 0^\circ$	3
Obr. 1.2 Odchyly od mediální roviny d_1 a d_2 a binaurální rozdíl Δl	5
Obr. 2.1 Reprodukory vyzařují takový zvukový signál, aby se virtuální zdroj zvuku jevil v definovaném místě.	6
Obr. 2.2 Ukázka stereofonní konfigurace se dvěma reproduktory.	7
Obr. 2.3 Popis amplitudového panoramování pomocí vektorové základny.	9
Obr. 2.4 Panoramování pomocí vektorové základny pro více reproduktorů.	10
Obr. 3.1 Nastavení reproduktorů definující iluzorní prostor.	13
Obr. 3.2 Implementace pohybu virtuálního zdroje zvuku. AM je amplitudová modulace, L je vzdálenost posluchače od reproduktoru a x je vzdálenost mezi posluchačem a virtuálním zdrojem zvuku. Diagram je vytvořen pro konfiguraci n reproduktorů.	17
Obr. 4.1 Implementované grafické rozhraní aplikace v prostředí Matlab.	19
Obr. 4.2 Schéma úhlového rozložení jednotlivých reproduktorů pro libovolnou topologii.	20
Obr. 4.3 Zobrazení jednotlivých typů okénkových funkcí.	24
Obr. 4.4 Zobrazení implementace hlavního algoritmu aplikace.	26
Obr. 4.5 Zobrazení referenčního signálu pro testování přechodových funkcí.	27
Obr. 4.6 Jednotlivé signály s modifikovanými přechody. Zleva a) Hannovo, b) Bartlettovo, c) Hammingovo, d) Blackmanovo a e) Chebishevovo okno. ...	28
Obr. 4.7 Zobrazení přechodů mezi jednotlivými segmenty signálu pro rozdílné nastavení prolnání okénkové funkce s přechodem. Nastaveno je postupně a) 1 %, b) 5 %, c) 10 %, d) 20 %, e) 30 %, f) 40%.	31

Obr. 4.8 Aplikace okénkové funkce s vhodně nastavenými koeficienty pro jednotlivé přechody.....	34
Obr. 4.9 Nastavení příliš malých koeficientů pro menší procentuální skokové změny amplitudy dvou segmentů.	35
Obr. 4.10 Špatné nastavení koeficientů okénkové funkce pro velké procentuální rozdíly amplitudy.	36
Obr. 4.11 Nastavení příliš nízkých koeficientů pro velké rozdíly amplitudy přechodů.	36
Obr. 4.12 Zobrazení zvolené trajektorie pohybu virtuálního zdroje zvuku.....	38
Obr. 4.13 Časový průběh signálu pro počet interpolovaných bodů na 1 m rovno 2.	39
Obr. 4.14 Časový průběh signálu pro počet interpolovaných bodů na 1 m rovno 15. ...	40
Obr. 4.15 Zobrazení průběhu signálu pro 3 interpolační body na 1 m a velikost prolnutí 5 %.	41
Obr. 4.16 Zobrazení průběhu signálu pro 3 interpolační body na 1 m a velikost prolnutí 40 %.	41
Obr. 4.17 Trajektorie pohybu virtuálního zdroje zvuku při analýze vlivu rychlosti pohybu tohoto zdroje.	42
Obr. 4.18 Výstupní signál pro hodnotu 7 interpolačních bodů a velikost prolnutí 10 při rychlosti pohybu zdroje zvuku 0,5 m/s.	44
Obr. 4.19 Výstupní signál pro hodnotu 7 interpolačních bodů a velikost prolnutí 10 % při rychlosti pohybu zdroje zvuku 6 m/s.....	44
Obr. 4.20 Trajektorie pohybu virtuálního zdroje zvuku ve tvaru přímky umístěné před posluchačem.....	45
Obr. 4.21 Trajektorie pohybu virtuálního zdroje zvuku ve tvaru přímky umístěné za posluchačem.....	45
Obr. 4.22 Trajektorie pohybu virtuálního zdroje zvuku ve tvaru přímky umístěné nalevo od posluchače.....	46
Obr. 4.23 Trajektorie pohybu virtuálního zdroje zvuku ve tvaru přímky umístěné napravo od posluchače.....	46

ÚVOD

Aniž si to uvědomujeme, jsme v současnosti obkloповáni audiovizuální a výpočetní technikou. Domácnosti dnes hojně využívají vícekanálových reprosoustav pro ozvučení domácího kina, či herní konzole. Současným standardem jsou pěti kanálové a sedmi kanálové reprosoustavy. Díky tomu je dnes možné dosáhnout při sledování filmových DVD nebo při poslechu hudby relativně věrného prostorového zvuku. Je však nutné, aby navrhované algoritmy zpracovávaly zvukový signál v reálném čase s minimálním zpožděním při minimální výpočetní náročnosti. Vznikají tak stále nové sofistikovanější algoritmy. Pokud by bylo dosaženo věrné simulace pohybu virtuálního zdroje zvuku v prostoru ozvučeném reproduktory v reálném čase, poslechový a divácký zážitek by se znásobil.

Tématem této diplomové práce je zmiňované simulování pohybu virtuálního zdroje zvuku v horizontální rovině. Nejprve jsou popsány jednotlivé podněty, které jsou důležité pro určování pozice virtuálního zdroje zvuku v prostoru. V další kapitole je popsána metoda panoramování zvaná VBAP (Vector Base Amplitude Panning). Následující kapitola je stěžejní teoretickou částí celé práce. Je v ní popsána samotná technika simulování pohybu virtuálního zdroje zvuku. Na tuto problematiku poté navazuje praktická část diplomové práce. V této části jsou popsány jednak vytvořené grafické rozhraní v prostředí Matlab a jednak analýzy jednotlivých zvukových výstupů z této simulace z hlediska plynulosti přechodů mezi jednotlivými úseky signálu a také z hlediska plynulosti samotného přehrávání zvukového výstupu.

1 SLUCHOVÉ VNÍMÁNÍ ZVUKU V PROSTORU

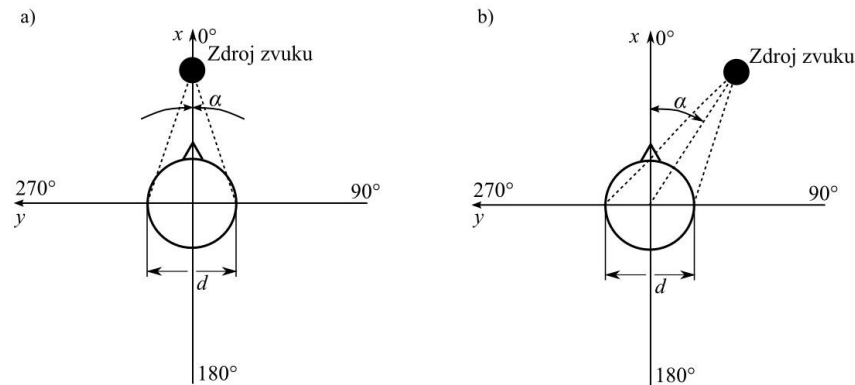
Aby bylo možné zkoumat metody simulace pohybujícího se zdroje zvuku v prostoru, je nejprve nutné seznámit se se základními fyzikálními hledisky lidského sluchu, které nám napomáhají k získání prostorového vjemu. Samotný sluchový vjem není přesným odrazem slyšeného zvuku, ale podléhá drobným změnám. Intenzita zvuku se tak projeví v hlasitosti slyšeného zvuku, frekvence zvuku je vnímána jako určitá výška zvuku a spektrální skladba zvuku složená z harmonických tónů je reprezentována jako barva tónu.

Lidská sluchová soustava je při poslechu zvuku ovlivněna mnoha podněty, podle nichž je možné určit směrovost zvuku. Většinu těchto podnětů lze rozdělit do dvou skupin a to do skupiny binaurálních podnětů a monoaurálních podnětů. Monoaurální podněty jsou založeny především na „kvalitě“ přicházejícího zvuku do zvukovodu. Tuto kvalitu nelze popsat matematickými vzorci. Sluchová soustava ji určuje na základě zkušeností, které jsou postupně shromažďovány během života člověka. Díky této vlastnosti je člověk schopen určit přibližnou pozici daného zvuku. Pokud se tedy člověk nachází ve známém prostředí, sluchová soustava je schopna přicházející zvukový signál upravit na základě dozvuků, překryvů a rušení tak, že je možné signál prostorově lokalizovat. Pokud by bylo jako referenční prostor zvoleno neznámé prostředí, v prvním okamžiku by člověk nebyl schopen lokalizovat pozici zvuku s větší přesností. Monoaurální podněty jsou tedy pro určení prostorového vjemu zvuku velmi důležité.[1]

Binaurální podněty lze na rozdíl od monoaurálních popsat matematicky. Tyto podněty jsou využity pro porovnání zvuku ze dvou odlišných detektorů, zatím co monoaurální podněty jsou pro oba detektory stejné. Tyto podněty lze popsat jak z hlediska časového (Interaurální časová diference - ITD), tak z hlediska intenzitního (Interaurální intenzitní diference - IID).

Podle studií je také známo, že určení polohy zdroje zvuku v prostoru je u složených zvuků a hluků snadnější než u čistých tónů [2], lidská sluchová soustava je totiž

navyknuta v průběhu života člověka spíše na zvukové signály s širším frekvenčním spektrem. S čistými tóny v běžném životě příliš do styku nepřicházíme.



Obr. 1.1 Zdroj zvuku v prostoru pro a) $\alpha = 0^\circ$ a b) $\alpha \neq 0^\circ$.

1.1 Interaurální časová diference

Interaurální časová diference označovaná jako ITD (Interaural Time Difference) vyjadřuje rozdílnou vzdálenost zdroje zvuku od obou uší, která je způsobena vychýlením zdroje zvuku od mediální roviny, což je rovina, která prochází přesným středem těla odpředu dozadu a rozděluje jej tak na dvě stejné symetrické poloviny. Díky tomuto vychýlení dojde ke změně v časové oblasti, kdy do obou uší dorazí zvuk s různým zpožděním [3]. Vychýlení v horizontální rovině je označeno tzv. azimutem, což je úhel, který svírá hlava posluchače a zdroj zvuku. Azimut $\alpha = 0^\circ$ a $\alpha = 180^\circ$ znamená, že je zdroj zvuku umístěn přímo před a za posluchačem, zde tedy nedochází k časové diferenci (viz Obr. 1.1 a)). U ostatních úhlů však k diferenci dochází (viz Obr. 1.1 b)). Tato uvedená diference se nazývá binaurální rozdíl Δl , který lze spočítat na základě vztahu [3]:

$$\Delta l = d_1 + d_2 = d \cdot \sin \alpha, \tag{1.1}$$

kde d_1 a d_2 jsou odchylky od mediální roviny, které jsou totožné, d je vzdálenost obou uší (počítá se s průměrnou hodnotou $d = 15$ cm) a α je vychýlení zdroje zvuku od mediální roviny. Pomocí empirických pokusů bylo zjištěno, že minimální časový rozdíl Δt_{\min} , který je lidská sluchová soustava schopna rozeznat, nastává při $\alpha = 4^\circ$ [4].

Při použití vztahu (1.1) lze tento časový rozdíl jednoduše spočítat:

$$\Delta t_{\min} = \frac{d \cdot \sin \alpha}{c} = \frac{0,15 \text{ m} \cdot \sin 4^\circ}{345 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}} \doteq 30,3 \mu\text{s}, \quad (1.2)$$

kde hodnota $c = 345 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ značí rychlost šíření zvuku v prostoru při teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C}$ [5]. Maximální časový rozdíl Δt_{\max} , který může nastat, je možné přibližně spočítat za pomoci výpočtu poloměru kružnice:

$$l_{\max} = \frac{d \cdot \pi}{2} = \frac{0,15 \text{ m} \cdot \pi}{2} \doteq 0,24 \text{ m}. \quad (1.3)$$

Přibližná vzdálenost uší je tedy $l_{\max} = 0,24 \text{ m}$. Maximální časový rozdíl Δt_{\max} lze poté vyjádřit:

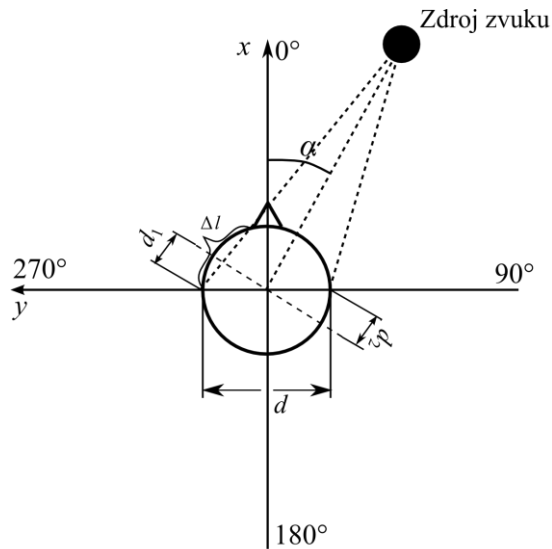
$$\Delta t_{\max} = \frac{l_{\max}}{c} = \frac{0,2356 \text{ m}}{345 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}} \doteq 0,68 \text{ ms}. \quad (1.4)$$

Pokud ze zdroje zvuku vychází periodický zvuk, časová diference se projevuje jako fázový rozdíl. Pokud nastává fázový posun zvukového signálu vydávaného zdrojem zvuku, je tento zdroj vnímán v prostoru, kde fáze zvuku předbíhá. Jestli se poté fáze posune více jak o $\frac{1}{2}$ periody dané zvukové vlny, zdroj zvuku se poté začne jevit na opačné straně prostoru, než byl původně. Tento jev je značně patrný u harmonických zvuků asi do 800 Hz [6]. Samotná interaurální časová diference však k prostorovému určení zdroje zvuku nestačí, jelikož člověk podle časové diference není schopen určit, zda zvuk přichází zepředu nebo zezadu. Člověk si tak většinou pomáhá natáčením hlavy.

1.2 Interaurální intenzitní diference

Druhým důležitým binaurálním podnětem, hlavně u vyšších kmitočtů, je interaurální intenzitní diference zvuku IID (Interaural Intensity Difference). Tato diference je způsobena zejména tzv. akustickým stínem hlavy, pak také difrakcí zvukových vln a směrovým účinkem vnějšího ucha. Následkem této diference je změna intenzity zvuku pro jednotlivé detektory. Dané podněty tak způsobují změnu spektra vnímaného signálu. Pokud je zdroj zvuku umístěn v mediální rovině, platí pro intenzitní diferenci stejné pravidlo jako u časové diference, intenzita dopadajícího zvuku bude tedy u obou detektorů stejná. Důležitým faktem je to, že se tato diference neprojevuje u nízkých kmitočtů, jejichž vlnová délka je větší než průměr hlavy. Tyto kmitočty hlavu obejdou a intenzita zvuku dopadající do obou detektorů je tak stejná. Naopak s vyššími kmitočty

je změna intenzity v závislosti na azimutu čím dál tím více patrná. Podle [2] je hranice kmitočtů, kdy se lidská sluchová soustava začíná řídit intenzitní diferencí, přibližně 1500 Hz.



Obr. 1.2 Odchyly od mediální roviny d_1 a d_2 a binaurální rozdíl Δl .

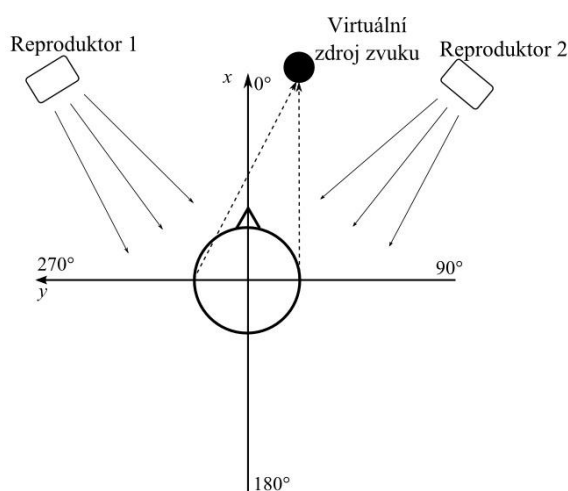
1.3 Spektrální zabarvení zvuku

Důležitým faktorem u prostorového poslechu je také spektrální zabarvení zvuku. Zvuk, který vydává zdroj zvuku, je předtím, než doputuje k ušním bubínku, postupně určitým způsobem upravován. Tyto úpravy závisí především na tvaru vnějšího ucha, hlavě a také na horní části trupu, kdy se zvuková vlna různě ohýbá a odráží. Dochází tak ke specifické filtraci zvukové vlny, díky které se zlepšuje schopnost lokalizace daného zvuku. Samotné filtrace se liší v závislosti na kmitočtu a zejména směru zvukové vlny. Tato skutečnost je popisována pomocí tzv. přenosové funkce hlavy značené HRTF (Head-Related Transfer Function) [7]. Jedná se o kmitočtové závislosti na azimutu, elevaci a vzdálenosti, kde elevace značí úhel, který svírá zdroj zvuku s posluchačem v mediální rovině. Funkci HRTF je možné získat tak, že je pouštěn z požadovaného směru zvuk a je měřena impulsní odezva hlavy HRIR (Head-Related Impulse Response). Impulsní odezva hlavy je poté podrobena Fourierově transformaci, čímž získáme přenosové funkce hlavy pro dané azimuty a elevační úhly.

2 PANORAMOVÁNÍ STATICKÉHO ZDROJE ZVUKU

Pod pojmem panoramování si lze představit simulaci umístění virtuálního zdroje zvuku v prostoru, který obsahuje určitý počet reproduktorů. Důležitým milníkem umožňujícím panoramování využít, bylo zavedení dvoukanálové (stereofonní) reprodukce. Zvukové pole tak bylo rozšířeno z bodového pole na horizontální zvukové pole. Horizontální zvukové pole dnes tak představuje nejrozšířenější reprodukční metodu v domácnostech. Postupem času začaly vznikat audio systémy s větším počtem kanálů, které našly uplatnění zejména v domácnostech. S příchodem filmů na DVD s vícekanálovou zvukovou stopou tak byl filmový zážitek obohacen o prostorový vjem. Trendem dnešní doby je zejména zpřesnit simulaci zvukového pole i pro polohy posluchače mimo střed reproduktorového prostoru.

Panoramování v tomto poli je pak možné chápat jako vytvoření virtuálního zdroje zvuku ve virtuálním zvukovém poli tvořeném daným počtem reproduktorů. K samotné realizaci jsou využity různé metody, které pomocí definovaných funkcí dokáží monofonní zvuk upravit tak, aby se posluchači virtuální zdroj zvuku ve virtuálním prostoru jevil v místě, které bylo nadefinováno (viz Obr. 2.1).

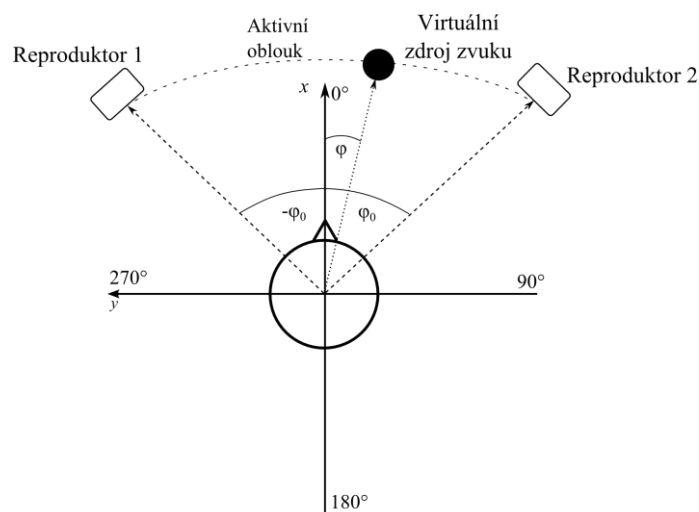


Obr. 2.1 Reproduktoři vyzařují takový zvukový signál, aby se virtuální zdroj zvuku jevil v definovaném místě.

2.1 Vektorově bázové amplitudové panoramování

Jak už z názvu vyplývá, vektorově bázové amplitudové panoramování, označované VBAP (Vector Base Amplitude Panning) [8] využívá pro simulaci virtuálního zdroje zvuku úpravy amplitudy zdrojového signálu. Tato metoda je popsána jak pro dvoudimenzionální tak pro třídimenzionální prostor. V tomto textu je však rozebrán pouze horizontální prostor, jelikož se tato práce mediální rovinou nezabývá.

Pro VBAP platí, že by reproduktory měly být od posluchače vzdáleny přibližně stejně a v poslechové místnosti by nemělo docházet k přílišným odrazům.



Obr. 2.2 Ukázka stereofonní konfigurace se dvěma reproduktory.

Zjednodušený princip metody je takový, že dané reproduktory vyzařují koherentní signály, které mohou mít různou amplitudu. Posluchač poté vnímá iluzi zdroje zvuku, který může být umístěn v horizontální rovině na kružnici mezi těmito reproduktory. To, kde má posluchač lokalizovat virtuální zdroj, je závislé na poměru amplitud signálů, které reproduktory vyzařují. Amplitudy těchto signálů jsou řízeny amplitudovými koeficienty g_1 a g_2 . Pokud se virtuální zdroj pohybuje, je vhodné zajistit konstantní vyzařovaný výkon, aby nedocházelo ke kolísání hlasitosti. Toho je dosaženo normalizováním amplitudových koeficientů. Vyzařovaný výkon je tak kontrolován koeficientem C , pro který platí [8]:

$$C = g_1^2 + g_2^2. \quad (2.1)$$

Parametr C tak může být chápán jako kontrola hlasitosti virtuálního zdroje, přičemž by měla platit podmínka $C > 0$. Dále pak také platí, že čím je parametr C větší, tím se virtuální zdroj zdá být posluchači blíže. Pokud však není potřeba řídit vzdálenost virtuálního zdroje, lze jej umístit na oblouk mezi reproduktory, jehož poloměr je roven vzdálenosti posluchače od reproduktorů. Tento oblouk se nazývá „aktivní oblouk“ (viz Obr. 2.2). Pro výpočet amplitudových koeficientů lze použít více metod. V dalším textu bude pojednáno o nejpoužívanějších z nich.

2.1.1 Trigonometrická metoda

Vnímání směru virtuálního zdroje lze pro amplitudové panoramování popsat pomocí sinové věty pro stereofonii [9]:

$$\frac{\sin\varphi}{\sin\varphi_0} = \frac{g_1 - g_2}{g_1 + g_2}, \quad (2.2)$$

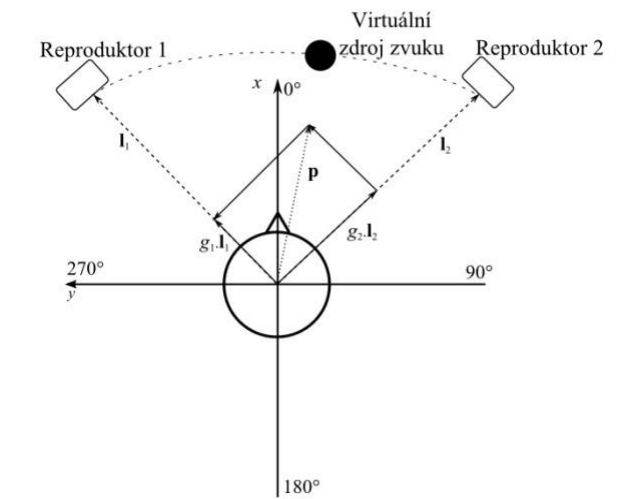
kde $0^\circ < \varphi_0 < 90^\circ$, $-\varphi_0 < \varphi < \varphi_0$ a $g_1, g_2 \in [0, 1]$. Úhel φ reprezentuje úhel mezi osou x a směrem virtuálního zdroje, $\pm\varphi_0$ je úhel mezi osou x a reproduktory (viz Obr. 2.2). Tato rovnice platí, pokud je hlava posluchače nasměrována přímo dopředu. Jakmile dojde k natočení hlavy jiným směrem, je třeba použít výpočet pomocí tangensové věty [10]:

$$\frac{\tan\varphi}{\tan\varphi_0} = \frac{g_1 - g_2}{g_1 + g_2}, \quad (2.3)$$

kde $0^\circ < \varphi_0 < 90^\circ$, $-\varphi_0 < \varphi < \varphi_0$ a $g_1, g_2 \in [0, 1]$. Tyto dvě věty (2.2) a (2.3) mohou být použity pouze za předpokladu, že zvuk přicházející od virtuálního zdroje zvuku mění pouze svoji velikost, což platí pro frekvence pod 500 – 600 Hz. Pro konstantní výkon zvuku pak lze získat amplitudové koeficienty podle (2.1) a (2.2) nebo (2.1) a (2.3).

2.1.2 Metoda vektorové základny

Dvoukanálové stereofonní reprodukční rozmístění lze popsat jednoduše pomocí vektorů (viz Obr. 2.3). Tohoto faktu je u této výpočetní metody využito. Díky tomuto popisu je poté metoda méně výpočetně náročná ve vektorově orientovaných nástrojích, jako je vývojové prostředí Matlab.



Obr. 2.3 Popis amplitudového panoramování pomocí vektorové základny.

Základna je definována pomocí dvou jednotkových vektorů $\mathbf{l}_1 = [l_{11} \ l_{12}]^T$ a $\mathbf{l}_2 = [l_{21} \ l_{22}]^T$ směřujících k daným reproduktorům. Symbol T označuje transponování matice, jedná se tak o sloupcový vektor. K virtuálnímu zdroji směřuje vektor $\mathbf{p} = [p_1 \ p_2]^T$. Za předpokladu definice předešlých vektorů lze vektor \mathbf{p} vyjádřit lineární kombinací vektorů \mathbf{l}_1 a \mathbf{l}_2 upravených amplitudovými koeficienty:

$$\mathbf{p} = g_1 \cdot \mathbf{l}_1 + g_2 \cdot \mathbf{l}_2, \quad (2.4)$$

kde g_1 a g_2 jsou amplitudové koeficienty. Pokud zapíšeme tyto koeficienty jako vektor $\mathbf{g} = [g_1 \ g_2]$, rovnice (2.4) pak může být přeformulována do maticového tvaru:

$$\mathbf{p}^T = \mathbf{g} \cdot \mathbf{L}_{12}, \quad (2.5)$$

kde $\mathbf{L}_{12} = [\mathbf{l}_1 \ \mathbf{l}_2]^T$. Tato rovnice může být řešena jen, pokud existuje inverzní matice \mathbf{L}_{12}^{-1} , pak:

$$\mathbf{g} = \mathbf{p}^T \mathbf{L}_{12}^{-1} = [p_1 \ p_2] \begin{bmatrix} l_{11} & l_{21} \\ l_{12} & l_{22} \end{bmatrix}^{-1}. \quad (2.6)$$

Inverzní matice \mathbf{L}_{12}^{-1} splňuje rovnost:

$$\mathbf{L}_{12} \mathbf{L}_{12}^{-1} = \mathbf{I}, \quad (2.7)$$

kde \mathbf{I} je jednotková matice. Pro inverzní matici \mathbf{L}_{12}^{-1} musí platit, že $\varphi_0 \neq 0^\circ$ a $\varphi_0 \neq 90^\circ$. To však ve většině případů není problém, jelikož toto umístění reproduktorů je

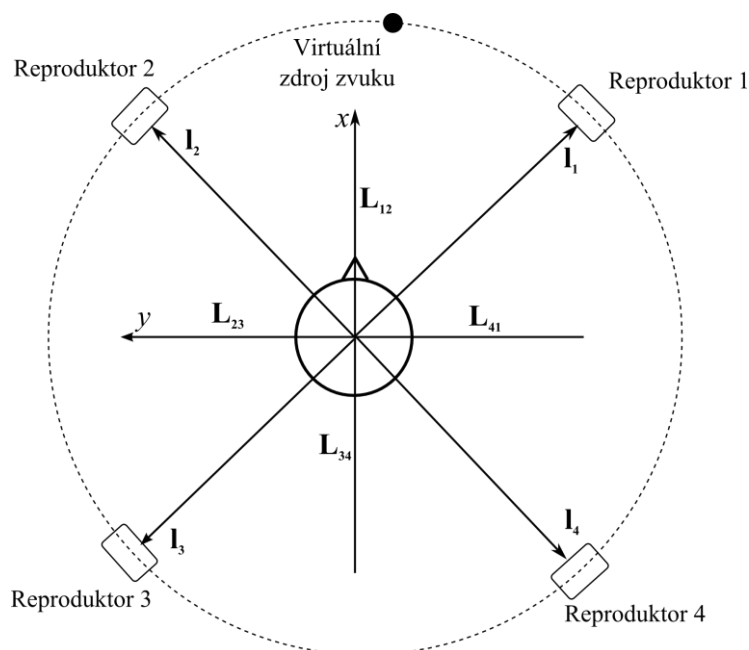
zvukově nezajímavé. Amplitudové faktory vypočítané na základě vztahu (2.6) splňují tangensovou větu (2.3).

2.1.3 Metoda vektorové základny pro více než 2 reproduktory

Jelikož je cílem diplomové práce aplikovat pohyb virtuální zdroje v prostoru zejména pro více reproduktorové systémy, je nutné rozšířit metodu panoramování také o případ, kdy se posluchač nachází uvnitř poslechového prostoru s více reproduktory.

Pro více reproduktorovou topologii je možné využít také vektorových bází, jelikož v každém jednotlivém časovém okamžiku se virtuální zdroj zvuku nachází právě mezi jedním párem reproduktorů a platí, že jeden reproduktor může vytvořit 2 reproduktorové páry. Systém s více reproduktory se tedy od systému se dvěma reproduktory liší tím, že obsahuje více vektorových základen, přičemž každý reproduktor může figurovat ve dvou takovýchto základnách. Virtuální zdroj zvuku je poté umístěn na výše popsaném aktivním oblouku mezi vybraným párem reproduktorů.

Nejjednodušší a nejpoužívanější variantou, jak zajistit správný výběr vektorové základny ve dvojrozměrných případech, je nechat je vytvářet sousedními reproduktory. Např. pro 4 reproduktorovou topologii mohou být vytvořeny základny L_{12} , L_{23} , L_{34} a L_{41} , jak je vidět na Obr. 2.4.



Obr. 2.4 Panoramování pomocí vektorové základny pro více reproduktorů.

Díky tomu, že se jednotlivé aktivní oblouky pro vybranou vektorovou základnu nepřekrývají, je zajištěna plynulá změna amplitudy při panoramování virtuálního zdroje zvuku. Pokud se virtuální zdroj zvuku přesune z jednoho reproduktorového páru na další reproduktorový pár, amplitudový koeficient, použitý u předchozího reproduktorového páru, je plynule snižován až na 0 v bodě změny páru. Tím je docíleno toho, že amplitudový koeficient použitý v předchozím aktivním oblouku nebude ovlivňovat následující reproduktorový pár.

Díky takto navrženému systému je pak možné simulovat polohu virtuálního zdroje zvuku v celém spektru úhlů 0° – 360° mezi virtuálním zdrojem zvuku a posluchačem. To, že v jednom okamžiku je aktivní pouze jeden pár reproduktorů, neznamená, že ostatní reproduktory zbytečně plýtvají energií. Neaktivní reproduktory mohou být naopak využity k dokonalejší reprezentaci polohy virtuálního zdroje zvuku pomocí reprodukce odrazů, dozvuků apod.

3 PANORAMOVÁNÍ POHYBUJÍCÍHO SE ZDROJE ZVUKU

Při běžném zvukovém poslechu předpokládáme plynulý přechod pohybuujícího se zvuku při jeho lokalizaci v prostoru. K tomu je potřeba jak přímý signál, tak nepřímý nebo signál odražený od překážek v dané lokaci. Při simulaci pohybu zdroje zvuku je plynulost jeho pohybu závislá na počtu a umístěním reproduktorů.

3.1 Lokalizační prvky

Pro lokalizaci jakéhokoliv reálného zdroje zvuku posluchač vyžaduje dva druhy informací:

- úhlovou polohu zdroje zvuku vzhledem k posluchači
- vzdálenost zdroje zvuku vzhledem k posluchači

Jelikož je více než pravděpodobné, že pohybuující se zdroj zvuku nebude umístěn v mediální rovině před posluchačem, je třeba řešit otázku úhlové lokalizace. Tato lokalizace zahrnuje zejména dříve popsané difference ITD a IID (viz kapitola 1.1 a 1.2).

Oproti panoramování statického zdroje zvuku je zde také třeba řešit vzdálenost zdroje zvuku od posluchače. Jedním z faktorů ovlivňujících úspěšnost lokalizace je zejména poměr energie přímého signálu a energie signálu nepřímého či odraženého. Přičemž intenzita přímého signálu klesá strměji se zmenšující se vzdáleností vzhledem k posluchači než intenzita signálu odraženého. Dalším faktorem ovlivňujícím lokalizaci je také ztráta nízko-úrovňových frekvenčních složek zvuku se zvyšující se vzdáleností.

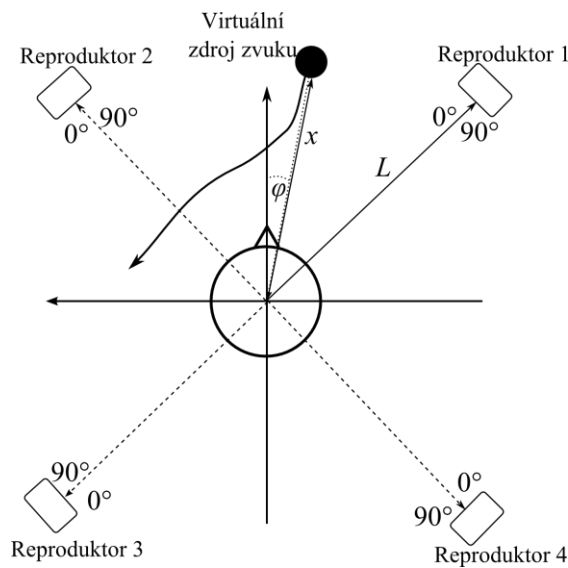
3.2 Dopplerův jev

Dopplerův jev ovlivňuje zvuk přijímaný posluchačem od pohybuujícího se zdroje zvuku. Dochází tak k tzv. Dopplerovu posunu aplikovanému na přijímaný signál. Na základě tohoto posunu je upravována akustická frekvence signálu přijímaného posluchačem

vzhledem k pohybu zdroje zvuku nebo posluchače nebo obou. Dopplerův posun je definován [11]:

$$\omega_l = \omega_s \frac{1 + \frac{v_{ls}}{c}}{1 - \frac{v_{sl}}{c}}, \quad (3.1)$$

kde ω_s je frekvence emitovaná zdrojem zvuku, v_{ls} je relativní rychlost směrem od posluchače ke zdroji zvuku, v_{sl} je relativní rychlost směrem od zdroje zvuku k posluchači a c je rychlost šíření zvuku ve vzduchu v daném prostoru (viz kapitola 1.1).



Obr. 3.1 Nastavení reproduktorů definující iluzorní prostor.

Dopplerův posun je možné implementovat jako časově-proměnnou zpožďovací linku. Pro pohyb posluchače směrem ke zdroji zvuku rychlostí v_{ls} platí [11]:

$$v_{ls} = \left[1 + \frac{v_{ls}}{c} \right], \quad (3.2)$$

kde symbol $[]$ značí zaokrouhlení směrem nahoru. Analogicky pro pohybující se zdroj zvuku směrem k posluchači rychlostí v_{sl} platí [11]:

$$v_{sl} = \left[1 + \frac{v_{sl}}{c} \right]. \quad (3.3)$$

3.3 Teoretická simulace daných podnětů

Aby se virtuální zdroj zvuku jevil jako pohybující se, je třeba nasimulovat některé hlavní podněty, pomocí kterých posluchač určuje směr a pohyb zvuku. Pro simulaci daných podnětů je navrženo prostředí se zvoleným počtem reproduktorů, které spolu tvoří kružnici (viz Obr. 3.1). Je tak vytvořen pomyslný perimetr, který tvoří hranice iluzorního prostoru. Posluchač je umístěn co nejvíce do středu iluzorního prostoru. Vzdálenost od všech reproduktorů je tak k posluchači přibližně stejná. Pokud posluchač není umístěn ve středu iluzorního prostoru, dochází ke geometrickému zkreslení prostorového obrazu v závislosti na jeho vzdálenosti od pomyslného středu. Tak, jak se virtuální zdroj zvuku pohybuje, mění se úhel vzhledem k posluchači. Aby byla vytvořena iluze zvuku v prostoru, je nutné měnit energii signálu v daných reproduktorech. Jak je vidět na Obr. 3.1, čtyři reproduktory rozdělují 360° prostor na čtyři kvadranty. Každá dvojice reproduktorů s posluchačem svírá úhel 90°. Energie signálu je pak měněna pro každý reproduktor v závislosti na úhlu posunutí φ . Úprava je provedena dle vztahů [14]:

$$g_{AR1} = 1 - \frac{\varphi}{\varphi_{\max}} \quad \text{a} \quad (3.4)$$

$$g_{AR2} = \frac{\varphi}{\varphi_{\max}}, \quad (3.5)$$

kde g_{AR1} a g_{AR2} je procentuální změna energie signálu a index AR značí, pro který je reproduktor koeficient je, a že je počítán na základě úhlu posunutí, φ je úhel, který svírá virtuální zdroj zvuku s posluchačem, v tomto případě $\varphi_{\max} = 90^\circ$ a je to úhel, který svírají reproduktory mezi sebou. Jakmile se virtuální zdroj zvuku přesune do dalšího kvadrantu, jsou počítány faktory procentuální změny energie pro reproduktory v daném kvadrantu podle vztahů (3.4) a (3.5). Pro případ Obr. 3.1 to jsou faktory g_{AR2} a g_{AR3} . Pro výpočet procentuálních faktorů je také možné použít vztahy využívající tangens úhlu [14]:

$$g_{AR1} = 1 - \frac{1 + \tan\left(\varphi - \frac{\varphi_{\max}}{2}\right)}{2}, \quad (3.6)$$

$$g_{AR2} = \frac{1 + \tan\left(\varphi - \frac{\varphi_{\max}}{2}\right)}{2}. \quad (3.7)$$

Jakmile je signál upraven na základě úhlových proporcí, je třeba simulovat vzdálenostní podněty. Simulace by měla být realizována stejně jako v případě úprav na základě úhlových proporcí změnou amplitudy jak přímého, tak odraženého signálu. Pro přímý signál platí [14]:

$$g_{DR} = \frac{1}{x}, \quad (3.8)$$

kde g_{DR} je procentuální faktor vyjadřující úpravu amplitudy přímého signálu pro oba reproduktory, index DR značí, že se jedná o koeficient počítaný na základě vzdálenosti pro všechny reproduktory, x vyjadřuje vzdálenost virtuálního zdroje zvuku od posluchače a L představuje vzdálenost posluchače od pomyslné kružnice mezi reproduktory v daném kvadrantu.

Odrazy signálu v daném prostředí patří k základním prvkům vzdálenostní lokalizace. Díky simulaci těchto podnětů je pak možné utvořit si o dané místnosti, ve které jsou simulace prováděny, určité informace jako velikost místnosti, tvar a materiál povrchu stěn či povrchů, od kterých se signál odráží. Pro odražený signál se předpokládá, že v malém prostoru je amplituda odraženého signálu vytvářena zdrojem zvuku s konstantní intenzitou. V reálných podmínkách se intenzita nepatrně mění. Pro dosažení efektu obklopení zvukem a vhodného rozptýlení do prostoru je potřeba na každý kanál aplikovat reverberátor s nezávislým zpožděním a zesílením. Úprava odraženého signálu má podobu [14]:

$$g_{DRR} = \sqrt{\frac{1}{x}}, \quad (3.9)$$

kde g_{DRR} je procentuální faktor vyjadřující úpravu amplitudy odraženého signálu pro oba reproduktory, index DRR značí, že je koeficient počítaný na základě vzdálenosti odražených signálů a platí pro všechny reproduktory, ostatní proměnné jsou stejné jako v předešlém vztahu (3.8). Po této úpravě signál prochází rovnoměrně daným reverberátorem. Celkový čas dozvuku je poté vyjádřen hodnotami zpoždění a zesílení daných reverberátorů.

Je však třeba poznamenat, že pokud by byl odražený signál distribuován na všechny kanály stejně, pro všechny vzdálenosti přímého signálu, ve vzdálenostech větších než je tzv. echo radius [16], může dojít k zamaskování přímého signálu

a k eliminaci úhlových úprav amplitudy signálu. Pro zamezení tohoto jevu je nutné energii odraženého signálu kontrolovat ve dvou hladinách a to:

- Globální odrazy, což je část odraženého signálu, která je vyzařována ve všech kanálech stejně a je závislá na převrácené hodnotě vzdálenosti posluchače a virtuálního zdroje zvuku.
- Lokální odrazy, tato část je distribuována mezi jednotlivé reproduktorové páry stejně jako přímý signál a tyto odrazy jsou závislé na $1 -$ (převrácená hodnota vzdálenosti posluchače a virtuálního zdroje zvuku).

Se vzrůstající vzdáleností posluchače a virtuálního zdroje zvuku pak narůstá hodnota lokálních dozvuků kompenzující ztráty energie přímého signálu. Tato implementace dozvuků se již blíží reálným situacím, kdy pokud vzdálenost virtuálního zdroje zvuku narůstá, vzdálenost odrazivé plochy klesá, čímž vzniká díky dozvuku určitá směrovost zvuku.

Signál je tedy upraven na základě úhlových a vzdálenostních dispozic. Dalším krokem je zohlednění Dopplerova jevu (viz kapitola 3.2). Jak bylo popsáno v kapitole 3.2, k Dopplerovu jevu dochází během změny vzdálenosti zvukového zdroje a posluchače. Dochází tak vlastně ke změně propagačního času $\tau(t)$. Z tohoto faktu tak vyplývá, že Dopplerův posun je možné řídit proměnnou zpožďovací linkou. V případě, že je pozice posluchače fixní, pohybuje se pouze zdroj a je emitován monochromatický signál, je možné popsat vztah mezi rychlostí a zpožděním jako [11]:

$$\frac{d\tau(t)}{dt} = -\frac{v_{sl}}{c}, \quad (3.10)$$

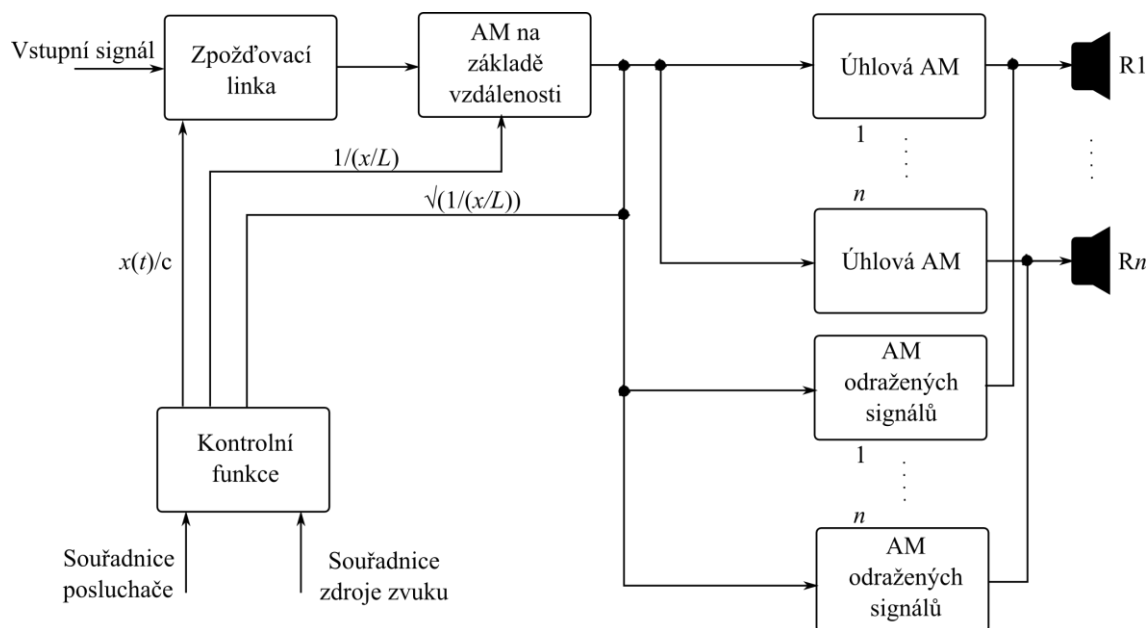
kde v_{sl} je relativní rychlost směrem od zdroje zvuku k posluchači, c je rychlost šíření zvuku ve vzduchu. Pokud je trajektorie pohybu zdroje zvuku známá, rychlost zdroje zvuku, která je promítnuta na daný úsek, může být vypočítána pro každý časový vzorek. Hodnota zpoždění tak může být vypočítána jako funkce času. Zmizí tak derivace. Pokud je však trajektorie neznámá a mění se v průběhu simulace, je potřeba zahrnout derivační funkci a použít vztah (3.10). Výpočet zpoždění tak lze zjednodušit podle [12]:

$$\tau(t) = \frac{1}{c} \|L(t) - S(t - \tau(t))\|, \quad (3.11)$$

kde $L(t)$ a $S(t)$ jsou příslušné pozice posluchače a zdroje zvuku v čase t , $\|\cdot\|$ je označení

Euklidovské vzdálenosti. Tento vztah je možné zjednodušit za předpokladu, že rychlost pohybu zdroje zvuku bude menší než 100 km/hod. Tato skutečnost byla zjištěna testováním (viz [13]). Vztah (3.11) lze poté zapsat:

$$\tau(t) = \frac{1}{c} \|L(t) - S(t)\| = \frac{x(t)}{c}. \quad (3.12)$$



Obr. 3.2 Implementace pohybu virtuálního zdroje zvuku. AM je amplitudová modulace, L je vzdálenost posluchače od reproduktoru a x je vzdálenost mezi posluchačem a virtuálním zdrojem zvuku. Diagram je vytvořen pro konfiguraci n reproduktorů.

4 SIMULACE POHYBUJÍCÍHO SE ZDROJE ZVUKU

V rámci praktické části této práce byla vytvořena aplikace s grafickým rozhraním, pomocí níž je možné simulovat pohybující se zdroj zvuku v prostoru mezi zvoleným počtem reproduktorů. Aplikace byla naprogramována v prostředí Matlab a umožňuje simulaci pohybu virtuálního zdroje zvuku ve vymezeném prostoru. V aplikaci jsou postupně nastaveny parametry určujících trajektorií a vlastnosti pohybu virtuálního zdroje zvuku. Při návrhu této aplikace bylo využito poznatků zejména ze zdrojů [13][14].

4.1 Popis rozhraní vytvořeného programu

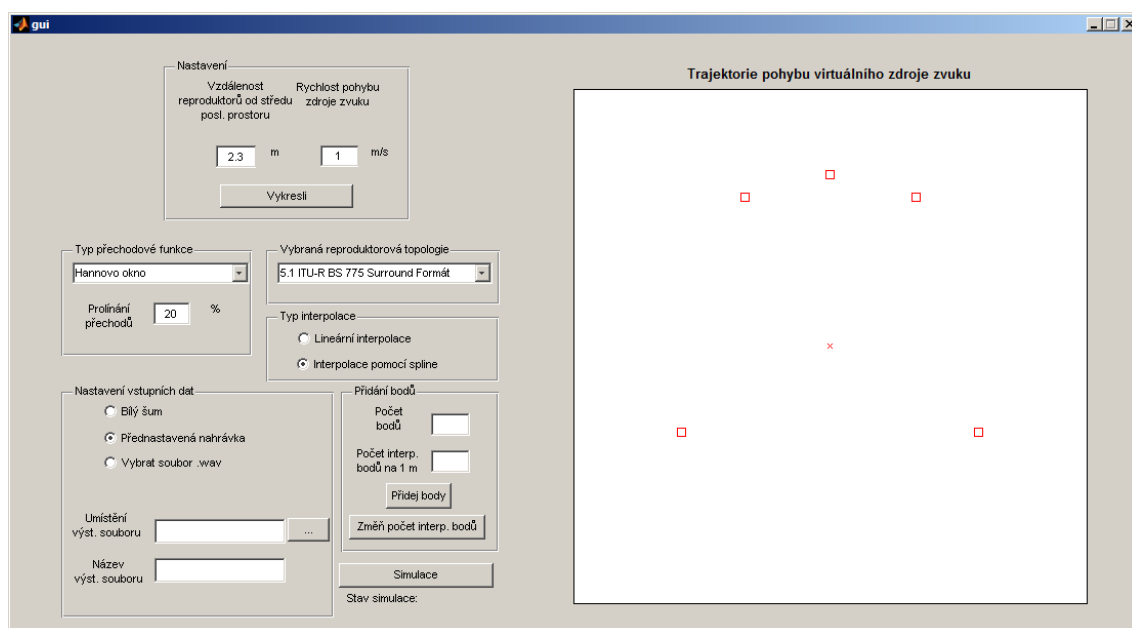
V prostředí Matlab byla vytvořena aplikace (viz Obr. 4.4), která je navržena poměrně variabilně tak, aby mohla být použita v různých poslechových prostorech. Samotné poslechové testy byly prováděny ve speciálně upravené poslechové místnosti. Tato aplikace neobsahuje implementaci výše popisovaného Dopplerova jevu. Tento jev je při simulování pohybu virtuálního zdroje zvuku velmi důležitý, při nízkých rychlostech se však uplatňuje jen velmi málo a jelikož byly poslechové analýzy prováděny při rychlostech nepřesahujících 6 m/s, což odpovídá chůzi či běhu, bylo možné tento jev ze simulací vypustit. Stěžejní částí práce bylo nalezení vhodných parametrů nutných k zajištění subjektivní plynulosti pohybu virtuálního zdroje v poslechové místnosti. Samotná implementace Dopplerova jevu tak, aby ve výsledném signálu nevznikaly nespojitosti, vyžaduje podstatně náročnější algoritmy, jejichž implementace nebyla součástí práce.

4.1.1 Popis prostředí

Základní uživatelské prostředí je vytvořeno v prostředí Matlab, které je také vyžadováno k běhu samotné aplikace. Toto uživatelské prostředí je vidět na obrázku Obr. 4.1. Skládá se z několika sekcí, nutných pro běh simulace.

Sekce Nastavení

V této sekci se provádí základní nastavení nutná pro běh aplikace. První parametr určuje vzdálenost reproduktorů od středu poslechového prostoru v metrech. Následující parametr určuje rychlost pohybujícího se virtuálního zdroje zvuku v prostoru v m/s. Definovaná rychlost je slouží pro výpočet doby trvání jednotlivých segmentů signálu. Tato doba je následně použita k vyčíslení počtu vzorků daného segmentu. Poloha posluchače uvnitř poslechového prostoru je pevně nastavena na střed tohoto prostoru tedy souřadnice (0,0). Jakmile jsou všechny parametry nastaveny, vykreslí se v grafickém okně napravo po stlačení tlačítka „Vykresli“ navržená topologie poslechového prostoru. Defaultně je nastaveno 5.1 ITU-R BS 775 Surround rozložení. Pokud některý z těchto parametrů není nastaven, vypíše se chybové hlášení s danými parametry podle toho, který parametr chybí.



Obr. 4.1 Implementované grafické rozhraní aplikace v prostředí Matlab.

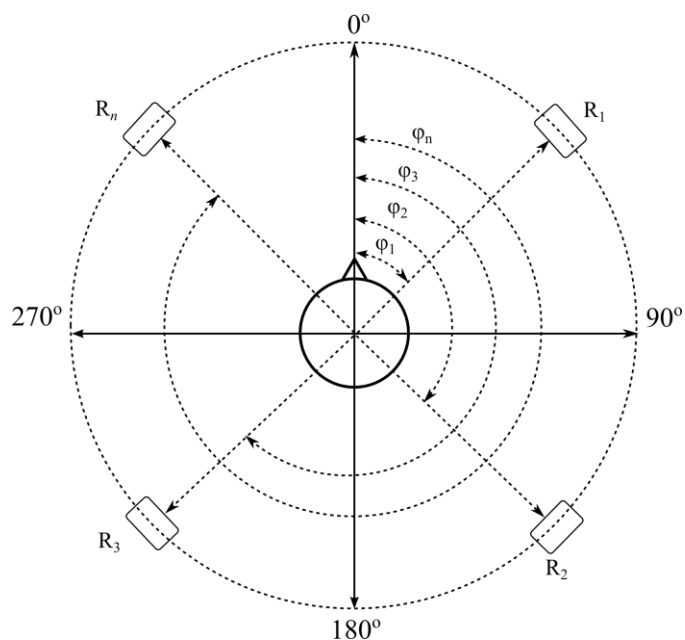
Sekce Počet reproduktorů

Jakmile je vykreslena základní topologie, je možné měnit počet reproduktorů v nastaveném poslechovém prostoru. Na výběr jsou 4 topologie s různým počtem

reproduktorů:

- 2 Channel Stereo Formát
- 4 Channel Quadraphonic Surround Formát
- 5.1 ITU-R BS 775 Surround Formát
- 7.1 DD EX/True HD Surround Formát.

Rozložení reproduktorů pro jednotlivé topologie je definováno pomocí následujícího schématu Obr. 4.2. Jednotlivé reproduktory jsou označeny R_1, R_2, R_3, R_n , kde $n \in \{1,7\}$. $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_n$ jsou označení úhlu mezi posluchačem a daným reproduktorem, přičemž $n \in (1,7)$ a úhel $\varphi \in \langle 0^\circ, 360^\circ \rangle$.



Obr. 4.2 Schéma úhlového rozložení jednotlivých reproduktorů pro libovolnou topologii.

Jednotlivé definované topologie mají následující nastavení úhlové pozice vzhledem k posluchači:

- 2 Channel Stereo Formát
 - $\varphi_1 = 45^\circ, \varphi_2 = 315^\circ$
- 4 Channel Quadraphonic Surround Formát
 - $\varphi_1 = 45^\circ, \varphi_2 = 135^\circ, \varphi_3 = 225^\circ, \varphi_4 = 315^\circ$
- 5.1 ITU-R BS 775 Surround Formát

- $\varphi_1 = 0^\circ, \varphi_2 = 30^\circ, \varphi_3 = 110^\circ, \varphi_4 = 250^\circ, \varphi_5 = 330^\circ$
- 7.1 DD EX/True HD Surround Formát.
 - $\varphi_1 = 0^\circ, \varphi_2 = 30^\circ, \varphi_3 = 110^\circ, \varphi_4 = 150^\circ, \varphi_5 = 210^\circ, \varphi_6 = 250^\circ, \varphi_7 = 330^\circ$

Definované rozložení a počet reproduktorů je možné měnit i zpětně, kdy zůstanou zachovány nadefinované body trajektorie pohybu virtuálního zdroje zvuku.

Sekce Typ interpolace

Následujícím krokem je výběr typu interpolace. V simulaci jsou nakonfigurovány dva typy interpolací a to lineární interpolace, kdy jsou nadefinované body lineárně proloženy nastaveným počtem bodů a interpolace pomocí křivek spline.

Interpolace pomocí spline je realizována pomocí volně šiřitelné funkce *interparc* [18], která umožňuje nastavit pevně danou vzdálenost mezi jednotlivými interpolovanými body, což integrovaná funkce Matlabu zvaná *spline* neumožňuje.

Lineární interpolace je implementována pomocí vlastního algoritmu. Vychází se z definovaného parametru „Počet bodů na 1 m“, ze kterého je vypočtena přibližná vzdálenost mezi jednotlivými interpolovanými body. Jelikož při definici trajektorie virtuálního zdroje zvuku může nastat případ, kdy mají 2 interpolované body stejnou x-ovou souřadnici, nelze využít jednorozměrnou předdefinovanou funkci Matlabu. Bylo tedy nutné funkci *interp1* adaptovat na podmínky simulace. Tato adaptace spočívá v rozdělení navržené trajektorie na dílčí úseky mezi zvolenými body. Pro každý z těchto úseků je spočítán počet interpolovaných bodů v závislosti na navoleném počtu bodů v simulaci.

Sekce Přidání bodů

Zde je definována vlastní trajektorie pohybu virtuálního zdroje zvuku. Nejdříve je nutné zadat počet bodů pro definování přibližné trasy pohybu a také počet interpolovaných bodů na 1 metr. Po stisknutí tlačítka „Přidej body“ se pak myší nadefinuje daný počet bodů v grafickém rámečku a vzápětí jsou tyto body interpolovány zvolenou interpolační metodou. Jakmile je tato struktura vykreslena, je možné libovolně měnit typ interpolace a reproduktorovou topologii, aniž by se poloha těchto bodů změnila. Pomocí tlačítka

„Změň počet interp. bodů“ je možné změnit tento počet v již nadefinované trajektorii. Stačí jednoduše změnit hodnotu počtu interpolovaných bodů a stisknout toto tlačítko. Pokud je třeba navolit jinou trajektorii pohybu virtuálního zdroje zvuku, stačí opět stisknout tlačítko „Přidej body“.

Sekce Typ přechodové funkce

Jelikož se v jednotlivých úsecích zvukového signálu může vlivem změny polohy vůči posluchači skokově měnit amplituda signálu, je nutné patřičně ošetřit přechody mezi jednotlivými úseky signálu. K tomuto účelu bylo nadefinováno 5 přechodových funkcí:

- Hannova okénková funkce
- Hammingova okénková funkce
- Blackmanova okénková funkce
- Bartlettova okénková funkce
- Chebyshevova okénková funkce.

Tyto přechodové funkce jsou vidět na Obr. 4.3. První volbou grafického rozhraní programu je tzv. Hannovo okno. Jedná se o symetrické okno délky L vracející vektor kladných hodnot w , okno je definováno rovnicí [17]

$$w(n) = 0,5 \left(1 - \cos \left(2\pi \frac{n}{N} \right) \right), \quad (4.1)$$

přičemž n nabývá hodnot $0 \leq n \leq N$ a okno může nabývat velikosti $L = N + 1$.

Další implementované okno se nazývá Hammingovo okno. Jedná se opět o symetrické okno délky L , jež vrací w kladných hodnot. Samotná funkce je počítána dle rovnice [17]

$$w(n) = 0,54 - 0,46 \left(1 - \cos \left(2\pi \frac{n}{N} \right) \right), \quad (4.2)$$

přičemž n nabývá hodnot $0 \leq n \leq N$ a okno může nabývat velikosti $L = N + 1$.

Následujícím zástupcem okénkových funkcí je Blackmanovo okno. Generovaná funkce je také symetrická a generuje vektor w délky L . Funkce je vypočtena na základě následující rovnice [17]

$$w(n) = 0,42 - 0,5 \cos \left(2\pi \frac{n}{N} \right) + 0,08 \cos \left(4\pi \frac{n}{N} \right), \quad (4.3)$$

přičemž n nabývá hodnot $0 \leq n \leq N$ a okno může nabývat velikosti $L = N + 1$.

V pořadí čtvrtou použitou okénkovou funkcí je Bartlettovo okno, které má tvar trojúhelníku. Délka vektoru \mathbf{w} je L . Koeficienty tohoto okna jsou závislé na tom, jestli je délka L sudá nebo lichá. Vektor \mathbf{w} je počítán [17]

pro L liché

$$w(n) = \begin{cases} \frac{2n}{N}, & 0 \leq n \leq \frac{N}{2} \\ 2 - \frac{2n}{N}, & \frac{N}{2} \leq n \leq N' \end{cases} \quad (4.4)$$

pro L sudé

$$w(n) = \begin{cases} \frac{2n}{N}, & 0 \leq n \leq \frac{L}{2} - 1 \\ 2 - \frac{2(N-n)}{N}, & \frac{L}{2} \leq n \leq N' \end{cases} \quad (4.5)$$

přičemž okno může nabývat velikosti $L = N + 1$.

Poslední implementovanou funkcí je Chebyshevovo okno. Tato funkce vrací vektor \mathbf{w} délky L , jehož Fourierovou transformací vzniknou ve frekvenčním spektru postranní laloky s rozdílem velikosti r od velikosti hlavního laloku v dB. Referenční hodnota r je 100 dB.

V grafickém rozhraní je třeba definovat 2 parametry a to velikost okna v %, tedy procentuální počet vzorků z daného segmentu, které budou danou okénkovou funkcí modifikovány. Definice v procentech je volena z důvodu proměnné délky segmentů. Pokud by byla velikost okna volena ve vzorcích, museli bychom znát velikost jednotlivých segmentů pro daný počet interpolovaných bodů. Procentuální vyjádření velikosti okna nám umožňuje zvolit počty vzorků daného přechodu ve stejném poměru pro jakýkoliv počet interpolovaných bodů. Dalším parametrem je typ okna, kde je z roletového menu na výběr z výše popsaných okénkových funkcí. Přednastavena je Hannova okénková funkce.

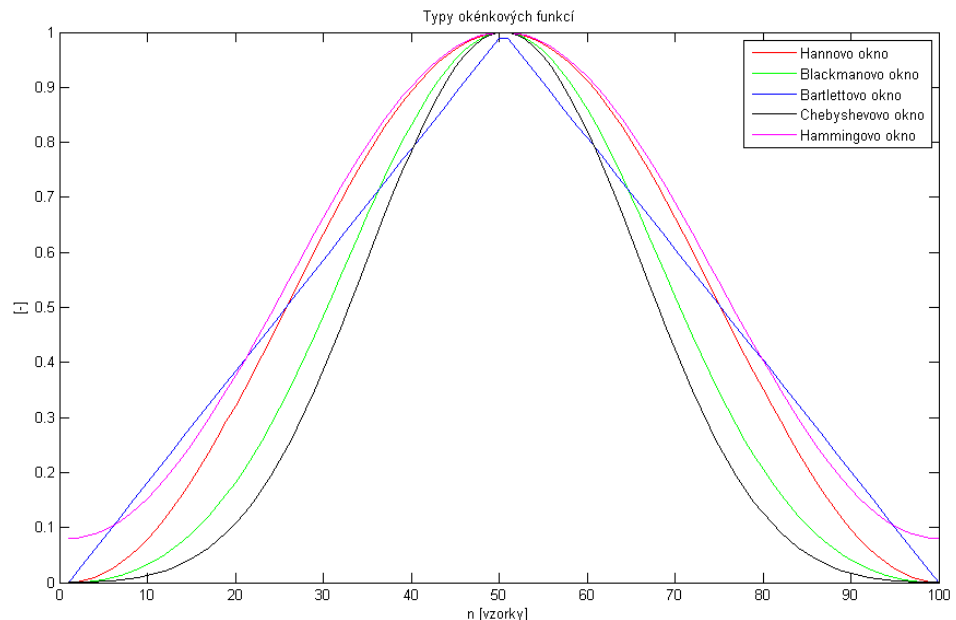
Sekce Nastavení vstupních dat

Toto je poslední sekce nutná k úspěšnému provedení simulace. Vstupní zvukový signál si můžeme zvolit ze tří možností:

- Bílý šum – Gaussovský bílý šum s rozptylem 0,08

- Přednastavená nahrávka – nahrávka `mono_original.wav` umístěná ve složce s aplikací. Tato nahrávka je přednastavena z důvodu dostačující délky trvání cca 1 minuty a také zastoupení velké části slyšitelných frekvenčních složek.
- Vybraný wav soubor – musí se jednat o jednobanální mono soubor formátu wav, který je v případě nedostatečné délky přehrávaného signálu vzhledem k nastavené rychlosti pohybu virtuálního zdroje zvuku řetězen za sebe

Následuje volba výstupní cesty, kde pokud tato cesta není zvolena, je přednastavena na `C:\`. Poslední položka je název výstupního souboru. Pokud není zadán, je nastaven na „`panning.wav`“.



Obr. 4.3 Zobrazení jednotlivých typů okénkových funkcí.

4.1.2 Popis hlavního algoritmu

Jakmile jsou zadány veškeré potřebné parametry simulace, stlačením tlačítka „Simulace“ je spuštěn proces výpočtu viz Obr. 4.4. Nejdříve je vypočtena vzdálenost mezi jednotlivými již interpolovanými body. Tato vzdálenost poté slouží k zjištění uražené doby v daném úseku mezi dvěma body. Tato hodnota je následně převedena na

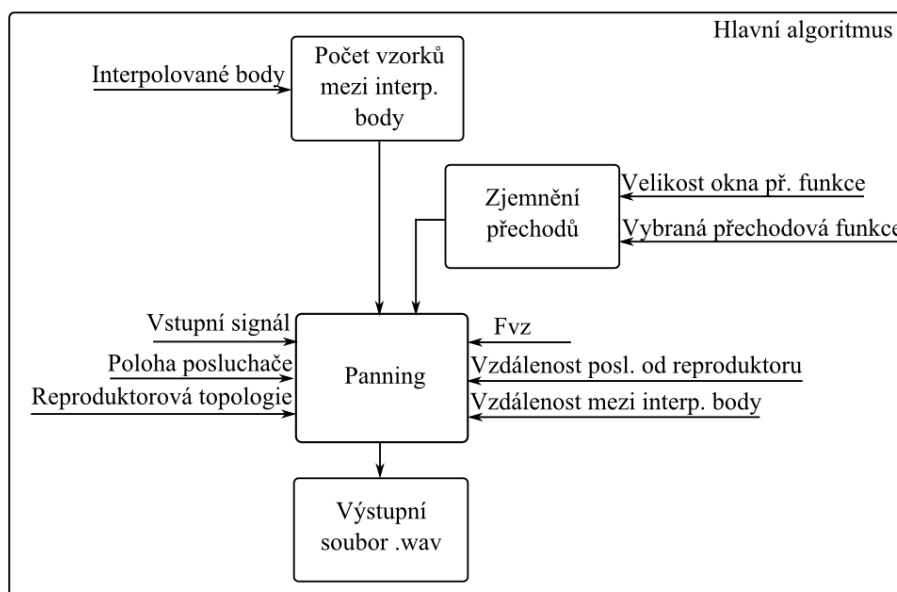
počet vzorků. Signál je tak rozdělen na dílčí části nazvané segmenty, které představují trajektorii virtuálního zdroje zvuku z jednoho interpolovaného bodu na druhý interpolovaný bod. Tyto jednotlivé segmenty jsou poté podrobeny dílčím úpravám jako úprava amplitudy na základě vzdálenosti.

Dalším krokem je tak samotný proces panoramování. Do tohoto procesu vstupuje poměrně velké množství proměnných. Na začátku jsou vyčísleny jednotlivé vzdálenosti mezi posluchačem a interpolovanými body, tedy body představujícími polohu virtuálního zdroje zvuku v daném úseku, a také jednotlivé úhly mezi posluchačem a virtuálním zdrojem zvuku. V další části je ošetřen případ, kdy je rychlost virtuálního zdroje zvuku natolik malá, že počet vzorků vstupního signálu je menší, než je vyžadováno. V takovém případě je vstupní signál řetězen za sebe do té doby, než je výsledný počet vzorků roven potřebnému počtu.

Následuje samotná aplikace panoramování v podobě úpravy amplitudy signálu. Nejprve na základě vzdálenosti mezi posluchačem a virtuálním zdrojem zvuku jsou vypočteny koeficienty pro jednotlivé segmenty signálu a poté jsou těmito koeficienty vynásobeny vzorky signálu na daném segmentu.

Posledním krokem je úprava amplitudy signálu na základě úhlu, který svírá posluchač s virtuálním zdrojem zvuku. Zde záleží na zvolené reproduktorové topologii, jelikož algoritmus vyžaduje také úhly, které svírá posluchač s reproduktory a je zřejmé, že různé reproduktorové topologie s různým počtem reproduktorů budou s posluchačem svírat úhly odlišné, jak je vidět v sekci „Počet reproduktorů“. Pro zvolenou topologii jsou tedy vypočítány jednotlivé amplitudové koeficienty, kterými jsou nakonec jednotlivé vzorky signálu vynásobeny. Jakmile jsou provedeny všechny tyto úpravy, je zkontrolováno nastavení výstupní cesty, kde bude uložen výstupní soubor wav provedené simulace a také zvolený název tohoto budoucího výstupního souboru. Pokud je vše v pořádku, je do výstupní proměnné maticového tvaru, zapsáno tolik řádků vyjadřujících jednotlivé kanály, kolik reproduktorů obsahuje zvolená reproduktorová topologie. Následuje aplikace zjemnění přechodů mezi interpolovanými body jednou z metod, jenž jsou popsány v části „Typ přechodové funkce“. Toto zjemnění je aplikováno na všechny vzniklé přechody. Dojde tak k utlumení skokových změn amplitudy vlivem násobení s vypočtenými amplitudovými koeficienty. Po této úpravě je

pak již vytvořen vícekanálový soubor wav.



Obr. 4.4 Zobrazení implementace hlavního algoritmu aplikace.

4.2 Analýza vytvořené simulace

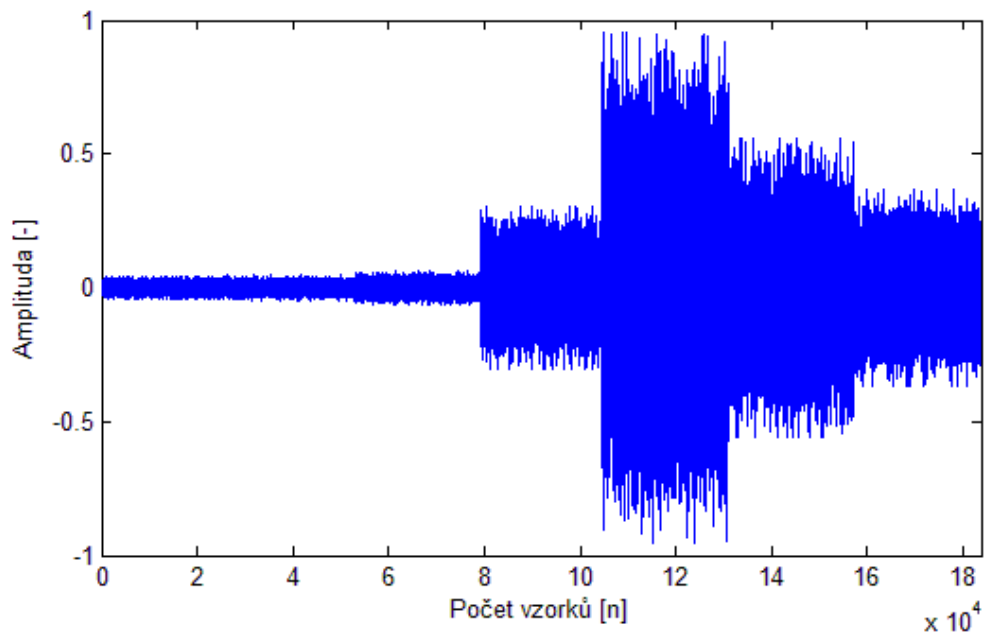
V této kapitole budou postupně popsány analýzy vytvořené simulace v prostředí Matlab. Jedná se zejména o porovnání a zhodnocení úprav přechodů panoramovaného zvukového signálu pomocí implementovaných výše popsaných přechodových funkcí. Další neméně důležitou částí je subjektivní zhodnocení plynulosti pohybu virtuálního zdroje zvuku po nadefinované trajektorii v závislosti na různých parametrech.

4.2.1 Typ přechodové funkce

První analýza se zabývá porovnáním jednotlivých přechodových funkcí a to z hlediska kvality potlačení skokových změn amplitudy signálu a zároveň co nejmenšího zkreslení signálu. Na Obr. 4.5 je vidět nadefinovaný referenční signál, kdy je zvolen bílý šum, jelikož jsou zde jednotlivé přechody více patrné než v případě hudební nahrávky. Nejdříve je v simulaci nutné nadefinovat parametry tak, aby byly zachovány stejné podmínky pro aplikaci každé z uvedených přechodových funkcí a také zvolit referenční signál, který je poté použit i v dalších analýzách.

Referenční nastavení parametrů pro porovnávání:

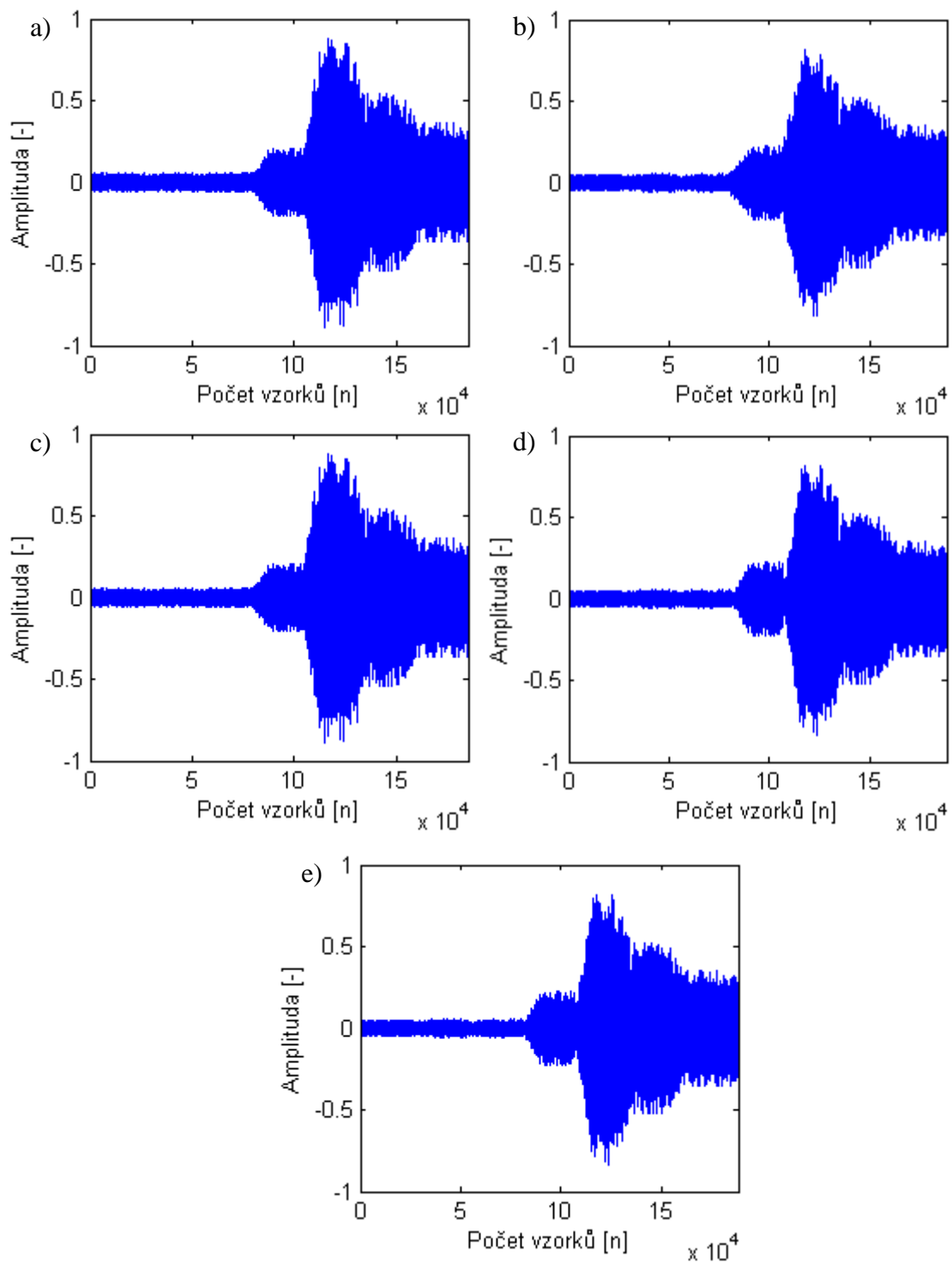
- Vzdálenost reproduktorů od středu poslechové místnosti: 2,3 m
- Rychlost pohybu virtuálního zdroje zvuku: 1 m/s
- Prolnutí přechodu: 20 %
- Topologie: Stereo formát
- Počet bodů: 3
- Počet interpolovaných bodů na 1 m: 2



Obr. 4.5 Zobrazení referenčního signálu pro testování přechodových funkcí.

Na následujícím obrázku Obr. 4.6 jsou postupně zobrazeny totožné signály, na něž jsou aplikovány postupně přechodové funkce využívající Hannova, Bartlettova, Hammingova, Blackmanova a Chebisheva okna. Funkce jednotlivých přechodů mají tvar dle popsanych závislostí v části „Typ přechodové funkce“.

Zleva je vidět aplikace Hannova okna pro nastavené prolnutí 20 %, které je v simulaci nastaveno jako první. Poté následují další okénkové funkce. Na následujících řádcích tedy začneme s popisem tohoto okna. Z výsledného signálu je patrné, že po aplikaci Hannova okna na jednotlivé přechody, tyto projevují nejméně strmé prolnutí. Jednotlivé přechody se subjektivně jeví být plynulejší než u ostatních přechodů.



Obr. 4.6 Jednotlivé signály s modifikovanými přechody. Zleva a) Hannovo, b) Bartlettovo, c) Hammingovo, d) Blackmanovo a e) Chebishevovo okno.

Amplituda signálu je oknem násobena po nepatrných krocích, přičemž samotné hodnoty okna jsou rozloženy tak, že se přechod jeví na začátku jako pozvolný a nejsou

zde patrné viditelné skoky. Jestli je podíl skokové změny amplitudy na rozmezí přechodu řádově do $1/3$ velikosti amplitudy segmentů s větší hodnotou, přechod se jeví jako plynulý, pokud je podíl amplitud vysoký, strmost přechodu je již příliš vysoká a je třeba zvolit prolínání většího segmentu signálu. Nevýhodou je naopak vyšší strmost směrem ke středu okna, což může způsobit, při volbě nevhodné velikosti překryvu přechodu, nepříjemné artefakty při poslechu signálu nebo také nedostatečné utlumení skokové změny amplitudy.

Další aplikace prolnutí přechodu je provedena pomocí Bartlettova okna. Z tvaru tohoto okna vyplývá, že strmost přechodu se jeví v celém rozsahu prolínání téměř jako konstantní. Strmost však není příliš vysoká, naopak je spíše pozvolná, což vede ke zjemnění daného přechodu. Pokud je však podíl amplitud na pomezí segmentů příliš vysoký, kdy pokud je segment s amplitudou nižší řádově více jak o $1/2$ velikosti amplitudy druhého úseku, jsou na daném přechodu patrné jemné skokové změny, které mohou degradovat plynulost přechodu. V porovnání s Hannovým oknem toto okno ovlivňuje nepatrně větší část jednotlivých segmentů z důvodu konstantní strmosti v celém rozsahu okna, zatímco u Hannova okna je strmost nejprve nízká, ale poté narůstá směrem nahoru k hodnotám, které jsou vyšší než u okna Bartlettova.

Třetí v pořadí je okno Hammingovo. Z vykreslených průběhů je vidět, že Hammingovo okno je velmi podobné oknu Hannovu. Rozdíl je ve strmosti přechodu u nižších hodnot velikosti okna řádově do poloviny výšky okna. Hammingovo okno má do těchto hodnot strmost nižší než je tomu u okna Hannova, díky tomu je subjektivně přechod na začátku rozmezí dvou segmentů plynulejší. Pokud je podíl amplitud na přechodu dvou segmentů řádově vyšší jak $1/2$, chová se Hammingovo okno velmi podobně jako okno Hannovo. V těchto podmínkách jsou daná okna téměř srovnatelná, přičemž samozřejmě záleží na volbě velikosti prolnutí.

Jako další je na jednotlivé přechody mezi segmenty aplikováno Blackmanovo okno. U tohoto přechodu jsou zřejmě nejvíce výrazné drobné skokové změny amplitudy signálu na daných přechodech při jakémkoliv rozdílu amplitud mezi dvěma segmenty, způsobené zřejmě nedokonalým výpočetním algoritmem, který jednotlivé koeficienty okénkové funkce nedostatečně aproximuje. Tvarem se toto okno podobá nejvíce Bartlettovu oknu nebo Chebyshevovu, avšak u tohoto okna je patrná vyšší strmost, která

je spolu s Chebyshevovým oknem jedna z nejvyšších. Díky této skutečnosti okno dokáže lépe reagovat na vysoké skokové změny amplitudy dvou segmentů při menší velikosti prolínání než u ostatních oken, ale zároveň při malých změnách amplitudy je strmost příliš vysoká.

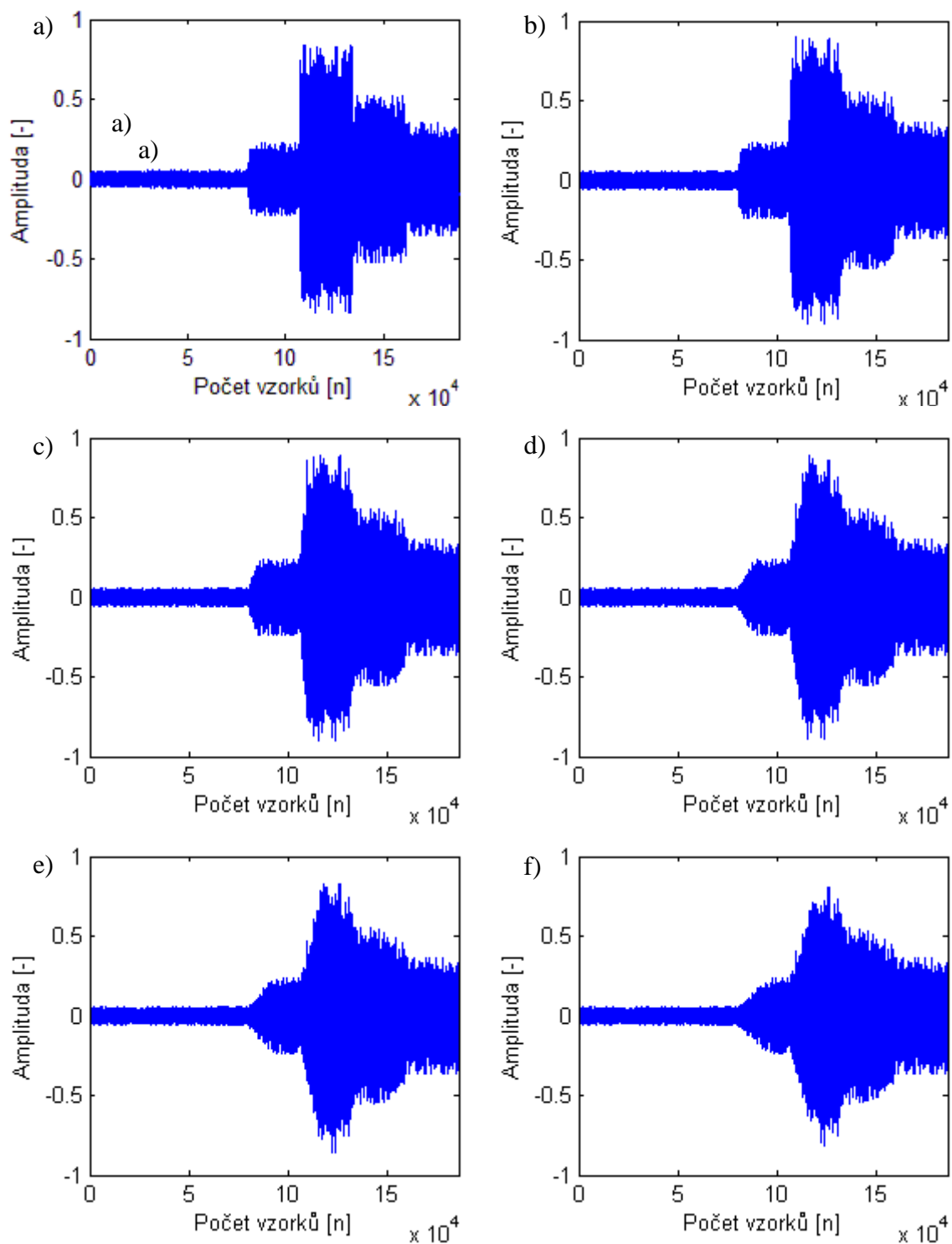
Posledním zástupcem okénkových funkcí je Chebyshevovo okno. Toto okno je téměř totožné s Blackmanovým oknem, strmost okna je ale ještě nepatrně vyšší. Celkově působí na signál velmi podobně jako okno Blackmanovo. Pokud je podíl amplitud dvou úseků malý řádově do $1/3$, je přechod příliš strmý. Naopak u vysokých skokových změn amplitudy je tento jev vítaný.

4.2.2 Velikost prolnutí dané přechodové funkce

Následující kapitola analyzuje vliv procentuální velikosti prolnutí na přechod signálu mezi dvěma úseky viz Obr. 4.7. Nastavená šířka prolnutí tedy ovlivňuje maximální diferenci amplitudy, která se na rozmezí dvou úseků signálu může nacházet. Pokud je prolnutí nastaveno na příliš nízkou hodnotu, přechodová funkce signál téměř neovlivní. V časové oblasti tak bude skoková změna jednoznačně patrná, což se projeví také při poslechu. Naopak pokud je velikost prolnutí nastavena na příliš vysokou hodnotu, amplituda signálu může být degradována, což se projeví při reprodukci signálu a následném poslechu.

Referenční nastavení parametrů:

- Vzdálenost reproduktorů od středu poslechové místnosti: 2,3 m
- Rychlost pohybu virtuálního zdroje zvuku: 1 m/s
- Nastavená okénková funkce: Hannovo okno
- Topologie: Stereo formát
- Počet bodů: 3
- Počet interpolovaných bodů na 1 m: 2



Obr. 4.7 Zobrazení přechodů mezi jednotlivými segmenty signálu pro rozdílné nastavení prolínání okénkové funkce s přechodem. Nastaveno je postupně a) 1 %, b) 5 %, c) 10 %, d) 20 %, e) 30 %, f) 40%.

Velikost prolnutí byla v simulaci postupně nastavena na hodnoty 1, 5, 10, 15, 20, 30 a 40 [%]. Jednotlivé hodnoty vyjadřují velikost prolnutí, která je vypočítána jako procentuální počet vzorků daného segmentu signálu. Pokud je tedy nastaveno prolnutí přechodové funkce na 10 % a dané 2 segmenty signálu, mezi kterými je aplikováno prolnutí přechodu, mají dohromady 40000 vzorků, velikost prolnutí bude 4000 vzorků. Hodnoty, které je možné v simulaci nastavit, jsou v rozmezí 0 % - 50 %. Z této definice rozmezí vyplývá, že prolnutí nelze nastavit na více jak 50 %. Důvodem tohoto omezení je fakt, že pokud by bylo prolínání nastaveno na více jak 50 %, došlo by k ovlivnění segmentu signálu, který již není součástí daného přechodu, ale přechodu následujícího nebo předešlého, což by vedlo k určitému zkreslení daného segmentu. V situaci, kdy máme přechod, jehož dva segmenty mají dohromady uvedených 40000 vzorků a je nastaveno prolnutí například na 70 %, je velikost prolnutí vyčíslena na hodnotu 28000 vzorků. Oba segmenty mají velmi podobné počty vzorků, jejichž odchylka je řádově ± 1 %. Z toho vyplývá, že velikost jednoho segmentu je přibližně 20000 vzorků. V tomto případě by na něj ale byla aplikována okénková funkce s počtem vzorků 28000, díky čemuž by byl ovlivněn celý segment a navíc segment, který tomuto segmentu předchází nebo za ním následuje.

Jako referenční signál byl zvolen opět stejný signál ve formě bílého šumu, jako tomu bylo u předešlé analýzy viz Obr. 4.5.

Pro hodnotu prolnutí 1 % je na Obr. 4.7 vidět, že okénková funkce jednotlivé přechody mezi segmenty téměř neovlivní. Skokové změny amplitudy jsou zde více než patrné, kdy je viditelný podíl amplitud i více jak o 1/2, v praxi však většinou k takto velkým podílům amplitudy nedochází, jelikož s nastavením většího počtu interpolovaných bodů je podíl jednotlivých segmentů signálu menší. Samotný přechod není téměř vůbec plynulý. Nicméně pokud generovaný signál vykazuje jen nepatrné skokové změny amplitudy signálu, tedy jeho vzdálenost od posluchače a úhel mezi virtuálním zdrojem zvuku a posluchačem jsou téměř zanedbatelné, je možné malé hodnoty prolnutí použít pro nepatrné zjemnění celkového průběhu signálu.

Hodnota prolnutí 5% již vykazuje mírně ovlivněné přechody mezi jednotlivými segmenty. V případě simulace nabývá amplituda signálu hodnot z intervalu $(-1,1)$. V případě hodnot amplitudy nad 1/3 maximální hodnoty je zjemnění přechodu

viditelné. Stále je však prolnutí pro odstranění skokových změn amplitudy nedostačující. Pokud je však cílem co nejméně ovlivnit výsledný signál a zároveň dosáhnout určitého stupně zjemnění přechodu, je možné této hodnoty pro signály s nepříliš výraznými skokovými změnami amplitudy využít.

Hodnota prolnutí 10% již jednotlivé přechody viditelně upraví. Pokud je podíl amplitud menší jak $1/2$, dochází k viditelnému zjemnění daných přechodů. U hodnot amplitudy signálu nad $1/3$ maximální hodnoty však rozdíl oproti prolnutí 5% není příliš pozorovatelný. Tuto hodnotu prolnutí tak lze považovat ještě spíše za nedostatečnou. Pochopitelně ji lze využít tam, kde je třeba co nejméně ovlivnit výsledný signál a zároveň alespoň určitým způsobem zredukovat skokové změny amplitudy signálu.

Zlomová hodnota prolnutí, kde je již zjemnění poměrně výrazné a zároveň zde nejsou jednotlivé segmenty příliš markantně zkresleny, je hodnota 20%. Aplikace prolnutí je viditelná i u skokových změn amplitud větších jak $1/2$ jejich podílu. U jednotlivých segmentů, jejichž amplituda je větší jak $1/3$ maximální hodnoty, toto prolnutí zajistí zjemnění daných přechodů, ale zároveň zachovává určitou část původního segmentu. U skokových změn amplitudy více jak $1/2$ však může docházet ke schodkovitým změnám amplitudy signálu.

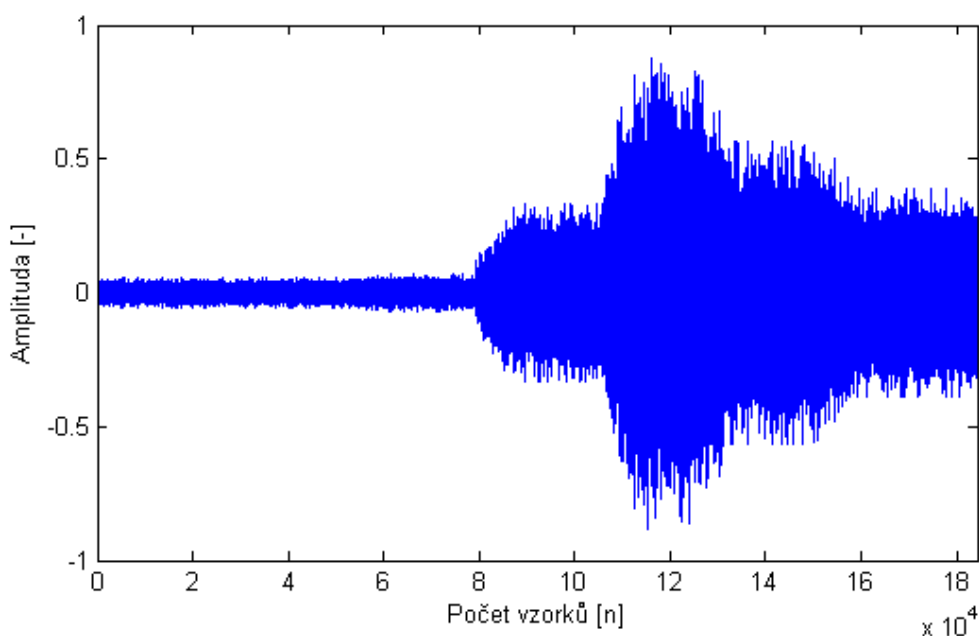
Jako nejvhodnější velikost prolnutí vzhledem ke zjemnění přechodu a zároveň přijatelnému ovlivnění signálu se jeví velikost prolnutí 30%. U hodnot amplitud jednotlivých segmentů vyšších jak $1/3$ maximální hodnoty jsou zde stále patrné původní amplitudové koeficienty, ale zároveň je přechod mezi nimi velmi pozvolný. V důsledku tohoto faktu se pak signál jeví jako poměrně plynulý. U nižších hodnot amplitud signálu řádově pod $1/3$ maximální hodnoty je nastavená hodnota prolnutí také vhodným poměrem mezi dostatečným zjemněním daných přechodů a nepřílišným ovlivněním signálu v daném segmentu.

Jako poslední hodnota prolnutí přechodů mezi segmenty signálu byla zvolena hodnota 40 %. U hodnoty 40% je vidět, že signál už je v daném segmentu z větší části ovlivněn danou okénkovou funkcí. Pro tyto hodnoty prolnutí již tedy dochází k zřetelné degradaci hodnot amplitudy v daných segmentech. Zároveň je zde však u skokových změn amplitudy větších jak $1/2$ maximální hodnoty viditelné poměrně solidní zjemnění těchto dvou segmentů. U segmentů se skokovou změnou amplitudy menší jak $1/2$

maximální hodnoty jsou mezi jednotlivými segmenty vidět téměř lineární přechody, což má pozitivní vliv na plynulost přechodů.

4.2.3 Nastavení koeficientů přechodové funkce

Pro jednotlivé přechody mezi dvěma segmenty je zásadní velikost podílu skokové změny amplitudy signálu mezi těmito segmenty. Tento podíl bude v dalším textu vyjádřen jako procentuální část amplitudy úseku, jehož medián velikosti amplitudy jednotlivých vzorků je větší, než medián velikosti amplitudy vzorků úseku druhého. Vhodné nastavení koeficientů je vidět na Obr. 4.8, kde je patrné, že okénková funkce je aplikována jak na přechody s větším podílem skokové změny amplitudy, tak na signály s menším podílem skokové změny amplitudy. Algoritmus, který je v simulaci implementován, tedy vyčísluje jednotlivé mediány segmentů, které patří k danému přechodu. Výsledné mediány těchto segmentů jsou porovnány mezi sebou a stanoví se segment s větší amplitudou. Následně je vypočítán podíl vypočtených mediánů, aby byla zjištěna přibližná procentuální hodnota skoku amplitudy na daném přechodu. Tato procentuální hodnota poté určuje hodnotu koeficientu, který je pro danou přechodovou funkci nastaven.

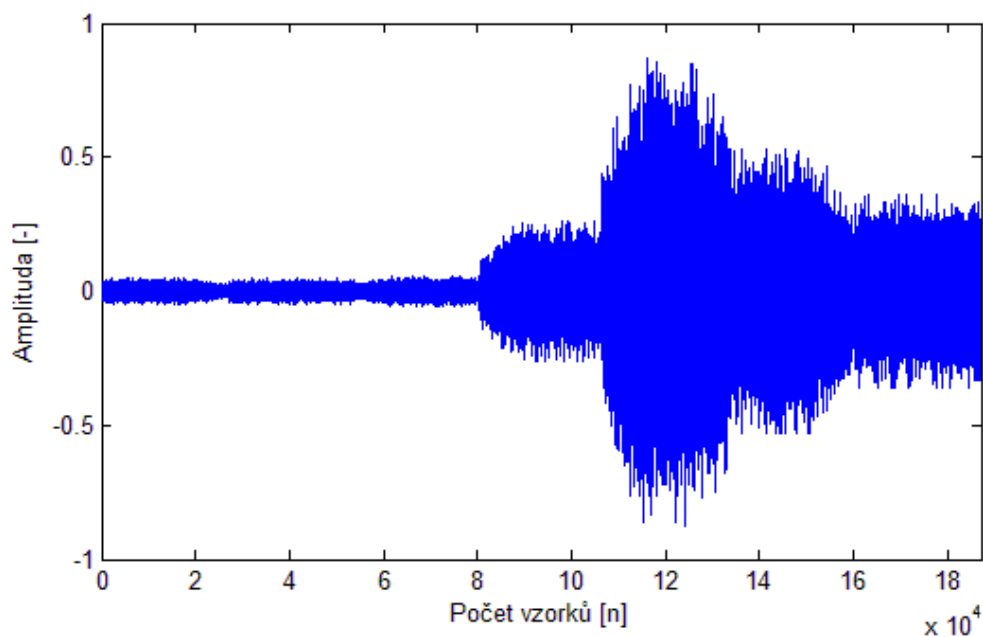


Obr. 4.8 Aplikace okénkové funkce s vhodně nastavenými koeficienty pro jednotlivé přechody.

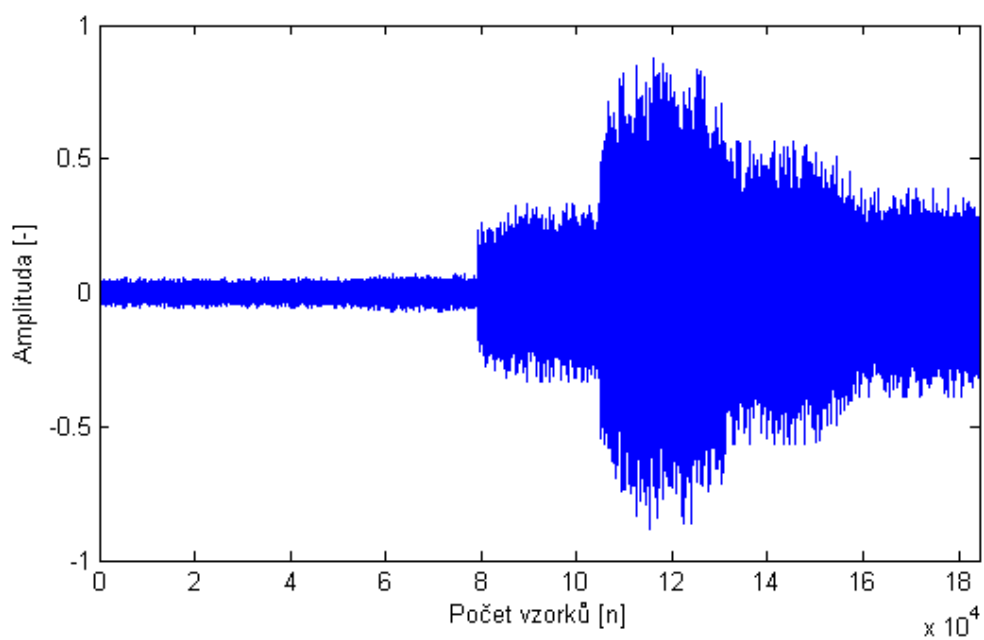
Tento koeficient plní úlohu výběru vhodné části okénkové funkce tak, že v případě malé procentuální změny amplitudy je koeficient nastaven na větší hodnotu cca 2-4 a je tak vybrána jen horní část y-ové osy zvolené okénkové funkce. Díky tomu nedochází k nechtěnému zmenšení amplitudy segmentu, jehož medián je menší než medián úseku druhého. Naopak pokud je procentuální změna amplitudy skokové změny velká tedy 1/2 maximální hodnoty amplitudy a více, koeficient je nastaven na hodnoty blížící se k 1. Tím je dosaženo toho, že se z okénkové funkce vybere téměř celá část hodnot y-ové osy.

Na Obr. 4.9 je vidět špatné nastavení koeficientů pro malé procentuální změny amplitudy přechodů a to konkrétně příliš nízká hodnota koeficientu. Je zde vidět nechtěné snížení amplitudy segmentů s menším mediánem amplitudy. Takovéto nechtěné ovlivnění amplitudy může ve výsledném signálu způsobit určité nepřesnosti, které mohou působit rušivě.

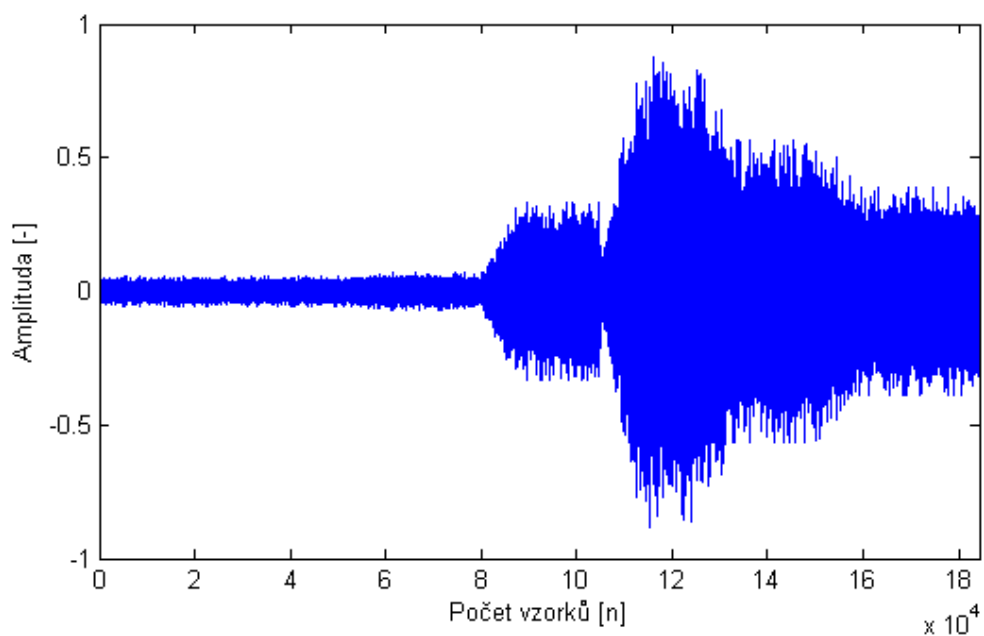
Opačným případem špatného nastavení koeficientů je zlé odhadnutí nastavení koeficientů pro velké procentuální změny amplitudy, jak je vidět na Obr. 4.10. Z obrázku je patrné, že pro malé procentuální změny amplitudy zůstaly koeficienty okénkové funkce nezměněny.



Obr. 4.9 Nastavení příliš malých koeficientů pro menší procentuální skokové změny amplitudy dvou segmentů.



Obr. 4.10 Špatné nastavení koeficientů okénkové funkce pro velké procentuální rozdíly amplitudy.



Obr. 4.11 Nastavení příliš nízkých koeficientů pro velké rozdíly amplitudy přechodů.

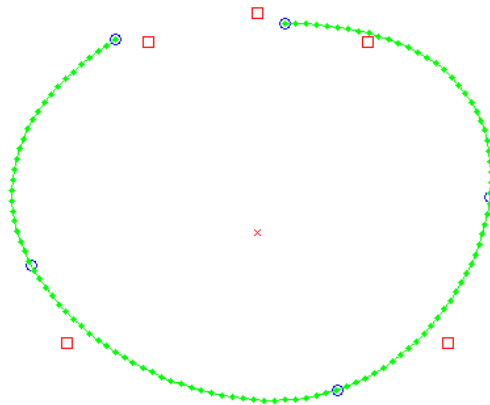
Nedochází tak k viditelnému zkreslení těchto přechodů, jako tomu bylo v předešlém případě. Změnily se však přechody, kde je procentuální změna amplitudy vysoká. Zde jsou koeficienty nastaveny příliš vysoko. Dochází tak k tomu, že definovaná okénková funkce nedokáže reflektovat celé spektrum změny přechodu a vznikne tak viditelná skoková změna amplitudy mezi těmito přechody, což má za následek nedostatečné zjemnění daných přechodů. Pokud je koeficient nastaven příliš nízko, jak je vidět na Obr. 4.11, dojde k viditelnému přílišnému snížení amplitudy daného segmentu, což způsobí opět nežádoucí zvýšení skokové změny amplitudy daných segmentů. V extrémním případě mohou v průběhu signálu za této situace vzniknout nespojitosti, které budou mít za následek slyšitelné praskání.

4.2.4 Vliv počtu interpolovaných bodů na 1 metr na plynulost pohybu virtuálního zdroje zvuku v prostoru

Jak bylo výše popsáno, zvolený vstupní signál je podle nastaveného počtu interpolačních bodů rozdělen na jednotlivé segmenty. Následující analýza se bude zabývat závislostí počtu interpolovaných bodů na 1 m, které jsou nastaveny v simulaci, na subjektivním dojmu plynulosti pohybu virtuálního zdroje zvuku v prostoru. Úkolem je nalézt vhodný počet těchto bodů tak, aby se jevil pohyb virtuálního zdroje zvuku jako plynulý a zároveň aby daná simulace nebyla příliš výpočetně náročná. Poslechové testy jsou provedeny pro následující nastavení:

- Vzdálenost reproduktorů od středu poslechové místnosti: 2,3 m
- Rychlost pohybu virtuálního zdroje zvuku: 0,8 m/s
- Nastavená okénková funkce: Hannovo okno
- Topologie: 5.1 ITU-R BS 775 Surround Formát
- Počet bodů: 5

Počet interpolovaných bodů na 1 m je postupně inkrementován na hodnoty 2, 3, 5, 7, 10, 12, 15, 18 a 20 interpolovaných bodů na 1 m. Celková délka trajektorie virtuálního zdroje zvuku je 12,5 m. Trajektorie pro počet 12 interpolovaných bodů na 1 m je vidět na Obr. 4.12.

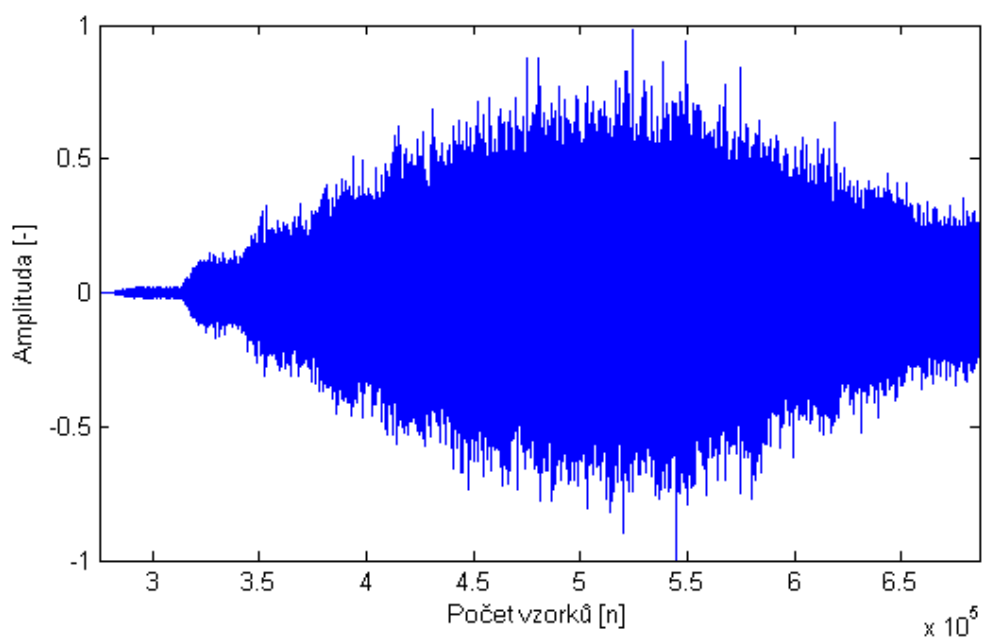


Obr. 4.12 Zobrazení zvolené trajektorie pohybu virtuálního zdroje zvuku.

Nejprve je nastaven počet interpolovaných bodů na 2 body na 1 m viz Obr. 4.13. Pro takovýto počet interpolovaných bodů amplitudová charakteristika signálu v časové oblasti vykazuje zřetelné skokové změny amplitudy. Pro toto nastavení jsou jednotlivé segmenty signálu, vymezené danými interpolovanými body, jasně slyšitelné. Lze tedy usoudit, že toto nastavení v žádném případě nekonverguje k plynulému řešení. Pro hodnotu 3 interpolované body na 1 m, je subjektivní poslechový dojem velmi podobný. Opět jsou zde jasně slyšitelné jednotlivé segmenty. Podobné charakteristiky lze nalézt i pro následující hodnoty počtu interpolovaných bodů.

Pro nastavený počet interpolovaných bodů na 7 je situace velmi podobná jako v případě nastavení hodnoty 3. Avšak je slyšitelné určité zlepšení, které však k plynulému řešení stále nekonverguje.

Určitý bod zlomu, kdy se pohyb virtuálního zdroje zvuku v prostoru začíná jevit jako plynulý, nastává při hodnotě 10 interpolovaných bodů na 1 m. Pokud je hlavním cílem dosažení maximální plynulosti pohybu virtuálního zdroje zvuku, pak je toto nastavení také nedostatečné. Stále jsou slyšitelné jednotlivé segmenty signálu.

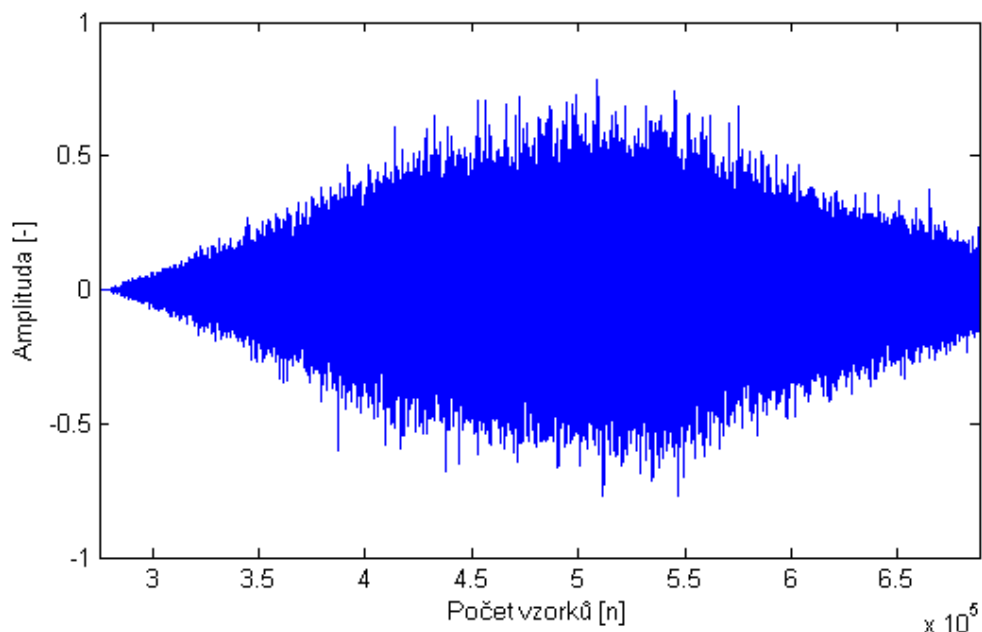


Obr. 4.13 Časový průběh signálu pro počet interpolovaných bodů na 1 m rovno 2.

Zachycení nepatrných skokových změn amplitudy již téměř není zřetelné při nastavení počtu interpolovaných bodů na 12. Amplitudová charakteristika v časové oblasti již vykazuje zřetelně plynulé přechody a jednotlivé segmenty jsou již téměř nepostřehnutelné. Při nastavení 15 bodů je již dosaženo efektu plynulosti pohybu virtuálního zdroje zvuku viz Obr. 4.14. Subjektivními poslechovými testy již nebyly zachyceny žádné zřetelné skokové změny mezi jednotlivými segmenty. Jak bylo zmíněno na začátku, k analýze byla použita reproduktorová topologie s 5 reproduktory. Definované rozmístění reproduktorů ukazuje, že dva zadní reproduktory mezi sebou a mezi předními reproduktory svírají větší úhel, než je tomu v případě předních reproduktorů, a také jsou od sebe a od předních reproduktorů více vzdáleny. Při poslechových testech bylo zjištěno, že tam, kde jsou od sebe reproduktory více vzdáleny, dochází k více znatelnému vjemu plynulosti, zatímco pokud jsou reproduktory více u sebe, je pro lidský sluch složitější jednotlivé změny amplitudy pro jednotlivé segmenty zachytit.

Další a zároveň poslední dvě nastavení měla hodnotu 18 a 20 interpolovaných bodů na 1 m. Z poslechových testů není jasně zřetelné žádné zlepšení plynulosti pohybu, či

zjemnění přechodů virtuálního zdroje zvuku. Z analýzy tedy vyplývá, že dostačující počet interpolovaných bodů na 1 m je 15, což odpovídá vzdálenosti mezi těmito body přibližně 6,7 cm.

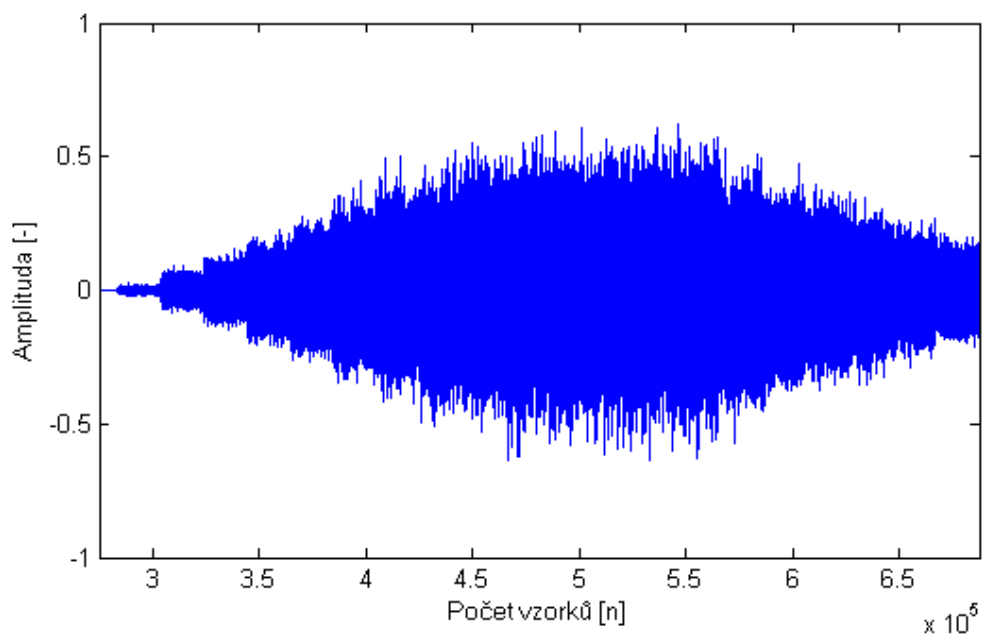


Obr. 4.14 Časový průběh signálu pro počet interpolovaných bodů na 1 m rovno 15.

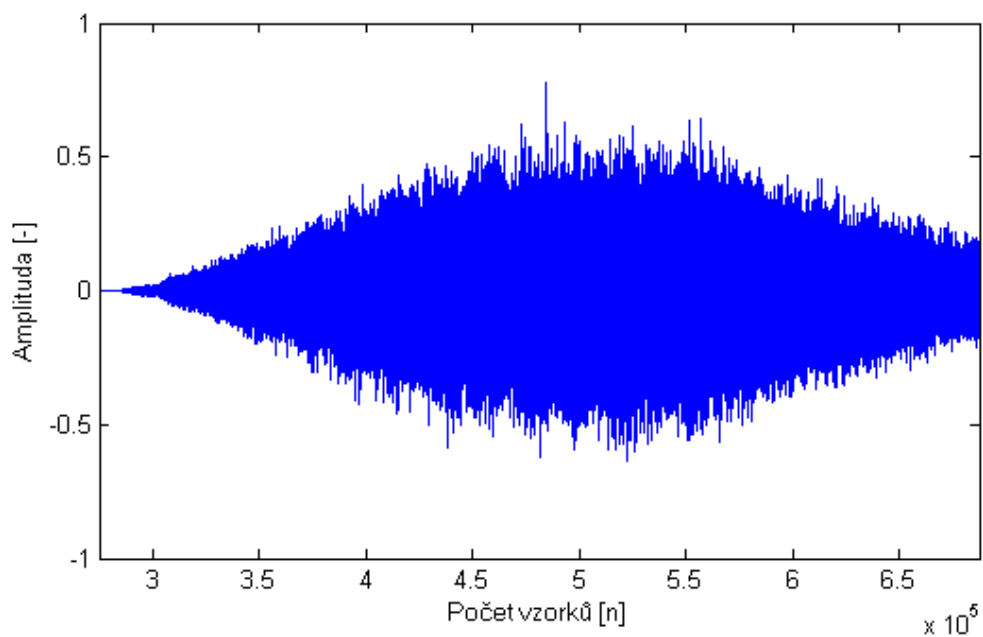
V rámci této analýzy byla ještě testována změna velikosti prolnutí přechodů, kdy pro menší počet interpolovaných bodů bylo zvoleno větší prolnutí a naopak pro větší počet bodů prolnutí menší. Z poslechové analýzy vyplynulo, že zejména u menšího počtu bodů, konkrétně 3 interpolované body, se subjektivní plynulost pohybu virtuálního zdroje zvuku znatelně zlepšila, viz Obr. 4.16 v porovnání s Obr. 4.15. Velikost prolnutí byla v tomto případě zvolena 30 a 40 %. Zejména pak hodnota prolnutí 40 % vykazovala subjektivní plynulost pohybu virtuálního zdroje zvuku na stejné úrovni jako pro 7 interpolovaných bodů při nastaveném prolnutí přechodů 20 %.

Z analýzy tak vyplývá, že čím vyšší počet interpolovaných bodů je nastaven, tím méně je signál okénkovou funkcí ovlivněn, jelikož jsou jednotlivé segmenty čím dál tím kratší a zároveň dochází také k čím dál menším skokovým změnám amplitudy mezi přechody. Naopak pro malý počet interpolovaných bodů na 1 m, řádově 2-7, je lepší využít většího prolnutí okénkovou funkcí, jelikož jsou zde patrnější skokové změny

amplitudy mezi jednotlivými přechody, přechodové funkce tak zde mají větší vliv.



Obr. 4.15 Zobrazení průběhu signálu pro 3 interpolační body na 1 m a velikost prolnutí 5 %.



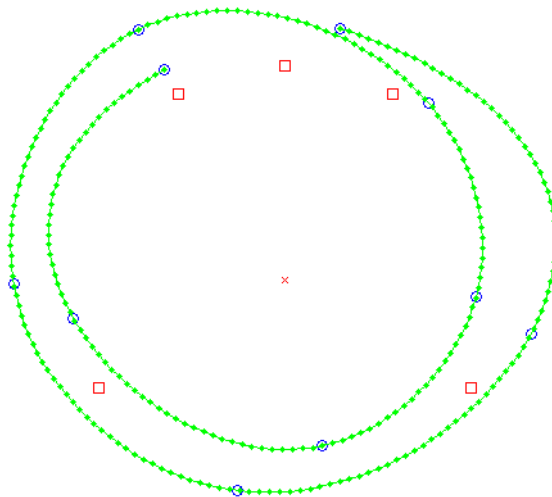
Obr. 4.16 Zobrazení průběhu signálu pro 3 interpolační body na 1 m a velikost prolnutí 40 %.

4.2.5 Analýza vlivu rychlosti pohybu virtuálního zdroje zvuku na plynulost pohybu tohoto zdroje zvuku

Nastavení parametrů simulace:

- Vzdálenost reproduktorů od středu poslechové místnosti: 2,3 m
- Nastavená okénková funkce: Hannovo okno
- Topologie: 5.1 ITU-R BS 775 Surround Formát
- Počet bodů: 10

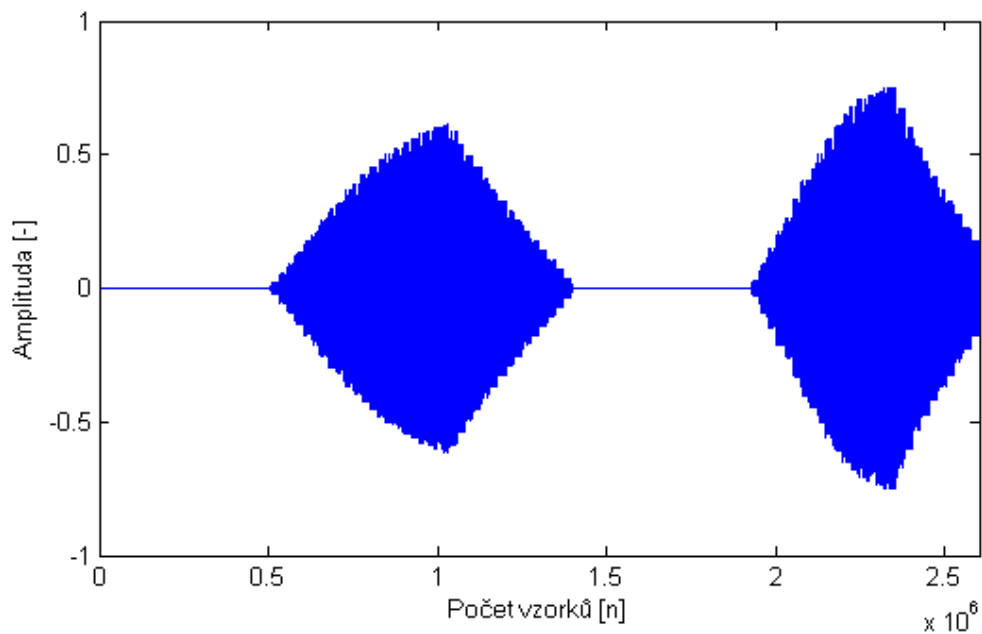
V rámci této analýzy je zkoumán vliv rychlosti pohybu virtuálního zdroje zvuku na subjektivní dojem plynulosti pohybu tohoto zdroje zvuku. Na Obr. 4.17 je vidět zvolená trajektorie pohybu virtuálního zdroje zvuku. V rámci simulace jsou postupně měněny dva různé parametry pro rychlosti 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4 a 6 m/s. Nejprve je volen různý počet interpolovaných bodů na 1m a to 4, 7, 10, 12, 15 a následně také různá velikost prolnutí okénkové funkce na hodnoty 10 a 40 %.



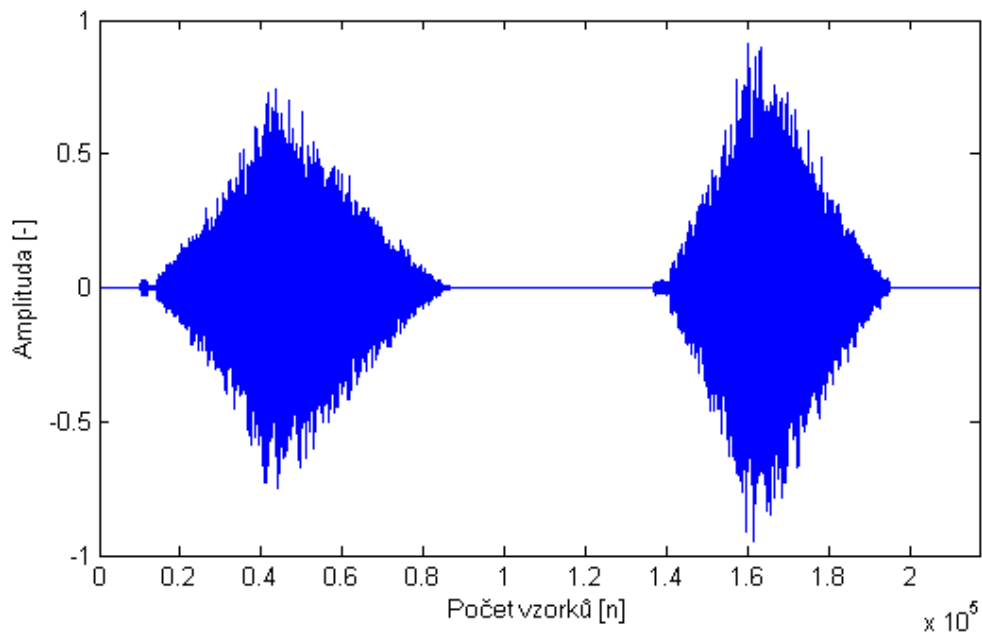
Obr. 4.17 Trajektorie pohybu virtuálního zdroje zvuku při analýze vlivu rychlosti pohybu tohoto zdroje.

Pro nízký počet interpolovaných bodů 4 a 7 je při menších rychlostech řádově do 1 m/s zřetelně pozorovatelný přínos prolnutí přechodů okénkovou funkcí, jak bylo popsáno v předešlém výzkumu. Jednotlivé segmenty signálu jsou stále dobře slyšitelné. Pro malý počet interpolovaných bodů řádově do 10 tak při nízké rychlosti do 1 m/s nedochází k efektu plynulosti pohybu virtuálního zdroje zvuku. Efektu plynulosti je dosaženo až od počtu 15 interpolovaných bodů. Nicméně se zde, jak už bylo popsáno výše, neuplatňuje velikost prolnutí okénkovou funkcí. Od hodnoty rychlosti pohybu virtuálního zdroje zvuku nad 1 m/s začínají postupně jednotlivé segmenty signálu splývat. To je patrné zejména u nižších hodnot počtu interpolačních bodů. U nastavené rychlosti 1,5 m/s jsou pro hodnotu 4 interpolačních bodů na 1 m stále ještě patrné jednotlivé segmenty signálu. Pro hodnotu 7 interpolačních bodů se již začíná pohyb virtuálního zdroje zvuku jevit jako plynulý. Stále jsou však patrné mírné skokové změny amplitudy mezi jednotlivými segmenty. Pohyb virtuálního zdroje zvuku pro tuto rychlost se však jeví být plynulý, na rozdíl od menších rychlostí, pro menší počet interpolovaných bodů tedy pro hodnotu 10. Zde začíná být zřetelná určitá závislost potřebného počtu interpolovaných bodů na 1 m a rychlosti pohybu virtuálního zdroje zvuku. Pro rychlost pohybu virtuálního zdroje zvuku s hodnotou 2,5 m/s se potřebný počet interpolovaných bodů opět zmenšuje. Slyšitelné rozdíly mezi jednotlivými počty interpolovaných bodů začínají být téměř nerozeznatelné. Zároveň však přestává být patrné zlepšení plynulosti pohybu virtuálního zdroje zvuku způsobené nastavením vyšší hodnoty prolnutí pro malý počet interpolovaných bodů. Od hodnoty rychlosti 4 a 6 m/s jsou rozdíly v plynulosti pohybu pro odlišné nastavení počtu interpolovaných bodů téměř nerozeznatelné. Zde je již nevhodné použít k simulaci nastavení více jak 7-10 interpolovaných bodů a také nastavení vyšší hodnoty prolnutí jak 10 %. Prolnutí se zde již téměř neuplatní. Na následujících obrázcích Obr. 4.18 a Obr. 4.19 je jasně viditelné zmírnění skokových změn amplitudy signálu. V obou případech je nastaven stejný počet interpolovaných bodů s hodnotou 7 a stejné prolnutí 10 %, rozdíl je však v rychlosti pohybu virtuálního zdroje zvuku, kdy první rychlost má hodnotu 0,5 m/s a druhá 6 m/s. Z analýzy vyplývá, že plynulost pohybu virtuálního zdroje zvuku je na počtu interpolovaných bodů závislá jen při nízkých rychlostech pohybu virtuálního zdroje zvuku do asi 2 m/s. Od této hodnoty je již rozdíl v plynulosti pro rozdílné hodnoty interpolačních bodů sluchem téměř nerozeznatelný. Prolnutí přechodů má vliv

na plynulost pouze při nižších rychlostech do 1 m/s a zároveň pro nízký počet interpolovaných bodů.



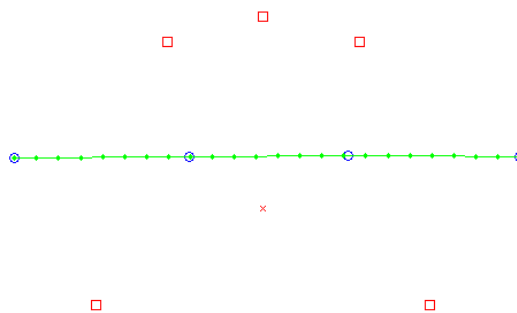
Obr. 4.18 Výstupní signál pro hodnotu 7 interpolačních bodů a velikost prolnutí 10 % při rychlosti pohybu zdroje zvuku 0,5 m/s.



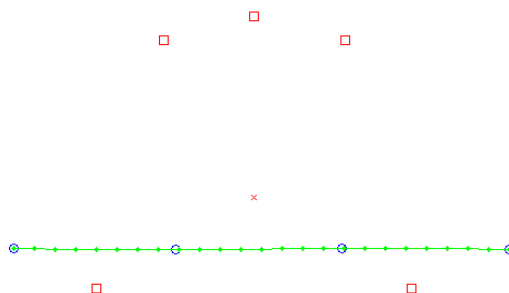
Obr. 4.19 Výstupní signál pro hodnotu 7 interpolačních bodů a velikost prolnutí 10 % při rychlosti pohybu zdroje zvuku 6 m/s.

4.2.6 Subjektivní vjem trajektorie signálu

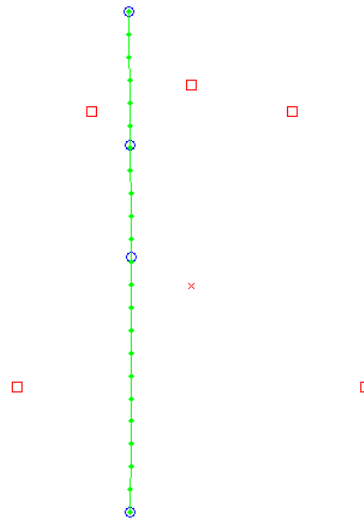
Poslední analýza se zabývá subjektivním vjemem trajektorie signálu. K tomuto účelu byly nadefinovány trajektorie ve tvaru přímky, jelikož zde lze dobře zachytit odchylky od navolené trajektorie.



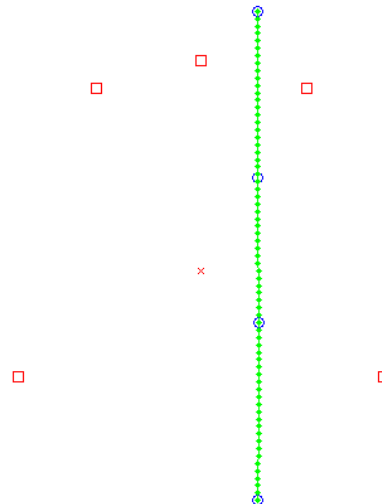
Obr. 4.20 Trajektorie pohybu virtuálního zdroje zvuku ve tvaru přímky umístěné před posluchačem.



Obr. 4.21 Trajektorie pohybu virtuálního zdroje zvuku ve tvaru přímky umístěné za posluchačem.



Obr. 4.22 Trajektorie pohybu virtuálního zdroje zvuku ve tvaru přímky umístěné nalevo od posluchače.



Obr. 4.23 Trajektorie pohybu virtuálního zdroje zvuku ve tvaru přímky umístěné napravo od posluchače.

Simulace byla provedena pro 5.1 ITU-R BS 775 Surround Formát a také pro 4 Channel Quadraphonic Surround Formát. Jednotlivé trajektorie jsou umístěny takovýmto způsobem z důvodu pozorování kopírování trajektorie pro různé úhlové rozmístění reproduktorů. Zvolená 5-ti reproduktorová topologie se totiž vyznačuje tím,

že přední reproduktory mezi sebou svírají o poznání menší úhel než je úhel mezi zadními reproduktory. V simulaci byly postupně nastavovány různé rychlosti pohybu virtuálního zdroje zvuku na 0,5, 1, 2 a 3 m/s. S poslechových testů vyplynulo, že různé nastavení rychlosti pohybu virtuálního zdroje zvuku na zlepšení vjemu trajektorie signálu v podstatě nemá vliv. V případě vyšších rychlostí nad 3 m/s naopak dochází k degradaci. Co však vliv má, je poloha přímky v daném poslechovém prostoru. Pro případ umístění přímky za posluchačem viz Obr. 4.21, je subjektivní vjem trajektorie nejméně. Je to způsobeno zejména tím, že reproduktory, mezi kterými je trajektorie navolena, mezi sebou svírají poměrně velký úhel 140°. Jednotlivé segmenty je tak možné zřetelněji vykreslit. V případě předních reproduktorů má však úhel, který mezi sebou reproduktory svírají, hodnotu 30°. Změny amplitudy jednotlivých segmentů jsou zde příliš vysoké, informace o trajektorii se tak při průchodu zdroje zvuku mezi těmito reproduktory ztrácí. Pro ověření tohoto faktu, jsou nadefinovány další 2 trajektorie, umístěné nalevo a napravo od posluchače. Jelikož jsou zrcadlově otočené, pro oba tyto případy dochází ke stejnému subjektivnímu vjemu. U obou případů je také patrné, že na začátku trajektorie, kdy zdroj zvuku prochází mezi předními reproduktory, lidský sluch špatně zaznamenává trajektorii. Ke zlepšení dochází po průchodu kolem předních reproduktorů. Zde je již svíraný úhel podstatně větší. Jednotlivé segmenty tak mohou být lépe prokresleny plynulejší změnou amplitudy jednotlivých segmentů. Na konci trajektorie však dochází k určité odchylce od přímky, což může být způsobeno nepřesným nastavením reproduktorů či nedokonalou poslechovou místností. Stejně trajektorie jsou použity také pro 4 Channel Quadraphonic Surround Formát, kdy je již pro všechny nastavené trajektorie subjektivní vjem trajektorie velmi podobný. Z provedené analýzy tedy vyplývá, že pro věrnější simulování trajektorie pohybu virtuálního zdroje zvuku jsou vhodnější reproduktorové topologie, které se vyznačují tím, že všechny reproduktory mezi sebou svírají stejný úhel, jako je tomu v případě kvadraturního reproduktorového rozložení.

5 ZÁVĚR

Tato diplomová práce je zaměřena na problematiku simulace pohybu virtuálního zdroje zvuku. V teoretické části práce jsou popsány sluchové podněty, které napomáhají při lokalizaci zdroje zvuku v prostoru. Další částí práce je popis panoramování a to konkrétně vektorové metody VBAP a zejména popis simulování samotného pohybu virtuálního zdroje zvuku v prostoru.

Na základě teoretické části je tak v prostředí Matlab vytvořena aplikace, simulující pohyb virtuálního zdroje mezi vybraným počtem reproduktorů v prostoru po definované trajektorii. Výstupní signál z této simulace je poté analyzován. Nejdříve jsou zkoumány implementované přechodové funkce. Z analýzy vyplývá, že všechny implementované okénkové funkce jsou schopny zjemnit přechody mezi úseky, avšak jako nejuniverzálnější okénková funkce bylo shledáno Hannovo okno, jehož strmost je na začátku přechodu nízká a naopak na konci přechodu vysoká. Díky této vlastnosti je pak možné poměrně věrně přechod aproximovat tak, aby se jevil jako plynulý.

V další části je testována procentuální velikost prolnutí přechodové funkce. Z amplitudových charakteristik v časové oblasti na Obr. 4.7 je viditelné, že menší hodnoty prolnutí 5-20 % nejsou pro zjemnění jednotlivých přechodů dostatečné, avšak příliš neovlivňují jednotlivé segmenty signálu. Patrného zlepšení je dosaženo po nastavení prolnutí přechodů na 30 % a ještě patrnější při nastavení 40 %. Zde je zejména pro signály s menším počtem aproximovaných bodů viditelné jasné zlepšení plynulosti.

V pořadí další analýza se zabývá zvolením vhodného počtu interpolovaných bodů na 1 m. Jako optimální hodnota počtu bodů byla vyhodnocena hodnota 15 interpolovaných bodů na 1 m, což odpovídá vzdálenosti jednotlivých bodů asi 6,7 cm. Při tomto počtu bodů již jednotlivé přechody nebylo možné sluchově zaznamenat. V rámci tohoto výzkumu byly také voleny různé velikosti prolnutí. Pro malý počet interpolovaných bodů řádově 2-7, se díky zvýšení prolnutí na hodnotu 40 % jeví pohyb virtuálního zdroje zvuku jako plynulejší, jelikož jsou částečně odstraněny skoky amplitudy mezi jednotlivými interpolovanými body. Ovšem určitá stacionarita zdroje zvuku je zde stále slyšitelná. Naopak pro větší počet tedy nad 10 interpolovaných bodů

nastavení většího prolnutí není potřebné, jelikož nedochází k žádnému slyšitelnému zlepšení.

Dalším faktorem ovlivňujícím plynulost pohybu virtuálního zdroje zvuku byla rychlost pohybu toho zdroje. Poslechovými testy bylo zjištěno, že při nízkých rychlostech do 2 m/s je plynulost závislá na počtu interpolovaných bodů, které by tak měly být nastaveny na hodnotu 12 a více a také se zde uplatňuje velikost prolnutí okénkovou funkcí. Naopak při vyšších rychlostech nad 2 m/s se již vyšší počet interpolovaných bodů téměř neuplatňuje. Zde je dostačující hodnota 7 a více interpolovaných bodů.

Poslední analýza zkoumala subjektivní vjem trajektorie virtuálního zdroje zvuku. Na základě subjektivního poslechu bylo zjištěno, že pro topologii, kde mezi sebou jednotlivé reproduktory svírají různé úhly, je trajektorie vedoucí skrz reproduktory svírající rozdílné úhly, zkruslena tam, kde je úhel mezi reproduktory malý, což je případ předních reproduktorů u definované 5-ti reproduktorové topologie. To je způsobeno příliš prudkými změnami amplitudy jednotlivých segmentů. Naopak pokud je úhel mezi reproduktory velký řádově 90° a více, jednotlivé segmenty signálu se vyznačují jemnější úpravou amplitudy signálu a tím pádem lepším prokreslením jednotlivých segmentů. Pro lepší subjektivní vjem trajektorie jsou tedy vhodnější topologie, jejichž reproduktory mezi sebou svírají shodné úhly jako tomu je v případě kvadrurní topologie.

Provedené poslechové analýzy jsou založeny pouze na subjektivním vjemu posluchače, jelikož v poslechové místnosti nelze dané analýzy porovnávat se skutečně se pohybujícím zdrojem zvuku. Z časových důvodů také nebylo možné vykonat poslechové analýzy pro více posluchačů. Jelikož byly analýzy zkoumány pro malé rychlosti do 6 m/s, v práci také není uvažován Dopplerův jev, jelikož se při takto malých rychlostech téměř neuplatňuje.

Při dalším zkoumání této problematiky je možné zaměřit se zejména na aplikaci a vliv Dopplerova jevu na pohyb zdroje zvuku při vyšších rychlostech, kdy je již tento jev velmi důležitý. Další možností je implementace pohybu zdroje zvuku v reálném čase, což by vyžadovalo využití jiného programovacího jazyka (např. jazyk C).

LITERATURA

- [1] CANTU, L. *Http://www.laurenscharff.com* [online]. 19. 2.1999 [cit. 2011-11-17]. Monaural Hearing and Sound Localization. Dostupné z WWW: <<http://www.laurenscharff.com/courseinfo/SL99/monaural.html>>.
- [2] WIGGINS, B. *An Investigation into the Real-time Manipulation and Control of Three-dimensional Sound Fields*. PhD Thesis. Derby : University of Derby, 2004.
- [3] SCHIMMEL, J. *Prostorové a směrové slyšení*. Učební text předmětu Elektroakustika, VUT v Brně, 2009.
- [4] MARŠÁLEK, P. *Kódování zvuku ve sluchové dráze a jeho aplikace na prostorové slyšení*. [Elektronický dokument] Brno: ÚTKO FEKT, VUT, 15. 11 2011. <http://fanous.utko.feec.vutbr.cz/marsalek_oct08/marsalek.pdf>.
- [5] <http://physics.mff.cuni.cz> [online]. [cit. 2011-11-18]. *Rychlost šíření zvuku*. Dostupné z WWW: <http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/txt_110.pdf>.
- [6] MERHAUT, J. a kol. *Příručka elektroakustiky*. Státní nakladatelství technické literatury, Praha 1964.
- [7] DUDA O., Richard. *HEAD RELATED TRANSFER FUNCTION* [online]. 1996-2000, [cit. 2011-11-19]. Dostupný z WWW: <http://interface.cipic.ucdavis.edu/CIL_tutorial/3D_HRTF/3D_HRTF.htm>.
- [8] PULKKI V. *Virtual Sound Source Positioning Using Vector Base Amplitude Panning*. J. Audio Eng. Soc., vol. 45, no. 6, pp. 456-466 (1997 June).
- [9] BAUER B. B., "Phasor Analysis of Some Stereophonic Phenomena" J. Acoust. Soc. Am., vol. 33, pp. 1536-1539 (1961 Nov.).
- [10] BERNFELD B., "Attempts for Better Understanding of the Directional Stereophonic Listening Mechanism," presented at the 44th Convention of the Audio Engineering Society, J. Audio Eng. Soc. (Abstracts), vol. 21, p. 308 (1973 May).
- [11] SMITH J., SERAFIN S., ABEL J., and BERNERS D., "Doppler simulation and the leslie," in Proceeding of the 5th International Conference on Digital Audio Effects (DAFx '02), Hamburg, Germany, September 2002.
- [12] TSINGOS N., *Simulation de champs sonores de haute qualité pour des applications graphiques interactives*, Ph.D. thesis, Université de Grenoble 1, Saint-Martin-d'Hères,

- France, 1998.
- [13] KRONLAND-MARTINET, R. - VOINIER, T., *Real-Time Perceptual Simulation of Moving Sources: Application to the Leslie Cabinet and 3D Sound Immersion*. France, 2008.
- [14] CHOWNING J. M., *The Simulation of Moving Sound Sources*. Computer Music Journal, Vol. 1, No. 3. (Jun., 1977), pp. 48-52.
- [15] KŘUPKA, A. *Moderní algoritmy posunu výšky základního tónu a jejich využití ve virtuálních hudebních nástrojích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 48 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Trzos.
- [16] WENDTH, K. "The Transmission of Room Information." J.Audio Eng. Soc. 9:282, 1961.
- [17] MATHWORKS. *MATLAB Product Documentation [online]*. 2007. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/help/toolbox/signal/ref/window.html>.
- [18] D'ERRICO, J. *MATLAB Central [online]*. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/34874-interparc/content/interparc.m>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

DVD	Digital Video Disc
IID	Interaural Intensity Difference
ITD	Interaural Time Difference
HRIR	Head-Related Impulse Response
HRTF	Head-Related Transfer Function
VBAP	Vector Base Amplitude Panning

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A	Obsah přiloženého CD.....	54
-----------	---------------------------	----

PŘÍLOHA A OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

- Elektronická verze diplomové práce ve formátu pdf
- Aplikace pro simulaci pohybu virtuálního zdroje zvuku v prostoru