

**UNIVERZITA PAVLA JOZEFA ŠAFÁRIKA V KOŠICIACH
PRÍRODOVEDECKÁ FAKULTA**

**MODELOVANIE KONTEXTUÁLNEJ PLASTICITY V REÁLNO
A VIRTUÁLNO M PROSTREDÍ**

UNIVERZITA PAVLA JOZEFA ŠAFÁRIKA V KOŠICIACH
PRÍRODOVEDECKÁ FAKULTA

**MODELOVANIE KONTEXTUÁLNEJ PLASTICITY
V REÁLNO M A VIRTUÁLNO M PROSTREDÍ**

DIPLOMOVÁ PRÁCA

Študijný program:	Informatika
Pracovisko (katedra/ústav):	Ústav informatiky
Vedúci diplomovej práce:	doc. Norbert Kopčo, PhD.
Konzultant diplomovej práce:	Ing. Peter Lokša, PhD.

Košice 2022

Bc. Stanislava LINKOVÁ

Zadanie záverečnej práce



Univerzita P. J. Šafárika v Košiciach
Prírodovedecká fakulta

ZADANIE ZÁVEREČNEJ PRÁCE

Meno a priezvisko študenta: Bc. Stanislava Linková
Študijný program: informatika (jednoodborové štúdium, magisterský II. st., denná forma)
Študijný odbor: Informatika
Typ záverečnej práce: Diplomová práca
Jazyk záverečnej práce: slovenský
Sekundárny jazyk: anglický


Názov: Modelovanie kontextuálnej plasticity v reálnom a virtuálnom prostredí
Názov EN: Modeling of auditory contextual plasticity in real and virtual environment
Cieľ:
- Vypracovať prehľad doterajšieho výskumu týkajúceho sa kontextuálnej plasticity (CP)
- Pripraviť prehľad vykonaných experimentov o CP
- Na základe poskytnutých MATLAB skriptov naprogramovať experimentálnu procedúru na zber dát
- Nazbierať experimentálne dáta na nových subjektoch
- Analyzovať a vyhodnotiť experimentálne dáta,
- Vyhodnotiť dáta v kontexte modelov adaptácie priestorového sluchu navrhnutých v Carlile et al. (2001) a Lingner et al. (2018).

Literatúra:
[1] Kopčo, N., Marcinek, L., Tomoriová, B., and Hládek, L'. (2015). "Contextual plasticity, top-down, and non-auditory factors in sound localization with a distractor," J. Acoust. Soc. Am. 137, EL281–EL287.
[2] Kopco, N., Best, V., and Shinn-Cunningham, B. G. (2007). "Sound localization with a preceding distractor," J. Acoust. Soc. Am. 121, 420–432.
[3] Hládek, L., Tomoriová, B., and Kopčo, N. (2017). "Temporal characteristics of contextual effects in sound localization," J. Acoust. Soc. Am. 142, 3288–3296
[4] Yost, W. A. (2000). Fundamentals of hearing: An introduction (4th ed.). San Diego: Academic Press.

Kľúčové slová: priestorové sluchové vnímanie, kontextuálna plasticita

Vedúci: doc. Ing. Norbert Kopčo, PhD.
Konzultant: Ing. Peter Lokša, PhD.
Oponent: doc. RNDr. Gabriela Andrejková, CSc.
Ústav: ÚINF - Ústav informatiky
Riaditeľ ústavu: doc. RNDr. Ondrej Krídlo, PhD.
Spôsob sprístupnenia elektronickej verzie práce: bez obmedzenia

Dátum schválenia: 29.04.2022


doc. RNDr. Ondrej Krídlo, PhD.
riaditeľ Ústavu informatiky

Pod'akovanie

Pod'akovanie patrí vedúcemu mojej diplomovej práce doc. Norbertovi Kopčovi, PhD. za odbornú pomoc a vedenie. Vďaka patrí aj konzultantovi Ing. Petrovi Lokšovi, PhD. a doc. Gabriele Andrejkovej, PhD. za technickú pomoc a poskytnutie potrebných materiálov k diplomovej práci.

Abstrakt v štátnom jazyku

Kontextuálna plasticita je efekt pri lokalizácii zvukov, ktorý sa prejavuje odchýlkami v lokalizácii stimulov nazývaných „targety“. Tieto odchýlky vznikajú, ak je okrem target stimulu prehrávaný aj určitý adaptačný stimul, ktorý nazývame „distraktor“ alebo „adaptor“. Odchýlky v lokalizácii sú smerom od adaptora. V rámci diplomovej práce bol vykonaný experiment vo virtuálnom reverberantnom a virtuálnom anechoickom prostredí. Cieľom tejto diplomovej práce bolo porovnať experimentálne dáta zo súčasného experimentu a z vykonaného experimentu v reálnom reverberantnom prostredí, a vyhodnotiť ich v kontexte dvoch existujúcich modelov adaptácie priestorového sluchu. Prvý model predpokladá, že aktivita neurónov kódujúcich sluchový priestor sa v dôsledku adaptácie potláča, kým druhý hovorí, že sa ich receptívne polia posúvajú, aby sa zlepšila separácia zvukov. Výsledky ukazujú väčšiu konzistenciu s predikciami pre prvý model, aj keď vo virtuálnom prostredí niektoré aspekty dát naznačujú aj existenciu mechanizmu popísaného druhým modelom.

Kľúčové slová: kontextuálna plasticita, odchýlky v lokalizácii, modely adaptácie priestorového sluchu

Abstrakt v cudzom jazyku

Contextual plasticity is localization aftereffect that is observed as bias in localization of stimuli called „targets“. The bias occurs when targets stimuli are interleaved with adaptation stimuli called „distractor“ or „adaptor“. Bias in localization is away from position of adaptor. Here, experiment in virtual reverberant and virtual anechoic environment was performed. The purpose of the diploma thesis is to compare data from real and virtual environments and evaluate them in the context of two previously proposed models of adaptation. First model predicts fatigue due to extended activation reduces responses in spatial channels, however, second model suggests adaptation of spatial representation to improve source separation. Results are more consistent with predictions for first model, even though some aspects in the virtual environment suggest existence of mechanism described by second model.

Key words: contextual plasticity, bias in sound localization, models for auditory space adaptation

Obsah

Obsah	5
Zoznam ilustrácií	7
Úvod	8
1 Ciele	9
2 Prehľad z oblasti priestorového sluchu	10
2.1 Lokalizácia zvukov.....	10
2.1.1 Smerová prenosová funkcia.....	13
2.2 Kontextuálna plasticita a predchádzajúce experimenty	14
2.3 Adaptačné modely a s nimi súvisiace experimenty.....	20
2.3.1 Carlile model.....	20
2.3.2 Lingner model.....	22
2.3.3 Zhrnutie a hypotéza.....	25
3 Návrh experimentu	26
3.1 Štruktúra experimentu	27
3.2 Forma odpovedania	32
3.3 Tréning	33
3.4 Technické parametre experimentu	34
4 Metódy	35
4.1 Úprava stimulov pre virtuálne prostredia	35
4.2 Analýza experimentálnych dát	36
4.3 Metódy použité pri vyhodnocovaní kontextuálnej plasticity	38
4.3.1 Štandardná odchýlka	39
4.3.2 Pearsonov korelačný koeficient	39
4.3.3 Informačný prenos	40
5 Výsledky experimentu	42
5.1 Výsledky priestorovej adaptácie.....	42
5.2 Temporálny profil adaptácie.....	47
5.3 Výsledky pre porovnanie modelov CP.....	55
5.3.1 Štandardná odchýlka v odpovediach	55
5.3.2 Korelácia	57
5.3.3 Informačný prenos v odpovediach.....	58
Záver	61

Zoznam použitej literatúry	62
Prílohy	64

Zoznam ilustrácií

Obr. 1. Náčrt rovín, ktoré používame pri určovaní polohy zvuku (Moore, 2003)	12
Obr. 2. Umiestnenie reproduktorov v experimente Kopčo et al. (2007)	15
Obr. 3. Vplyv kontextuálnej plasticity na lokalizáciu targetov (Kopčo a Andrejková, 2020)	16
Obr. 4. Výsledky experimentu (Tomoriová et al., 2011).....	17
Obr. 5. Rozmiestnenie experimentu v štúdiu Tomoriová et al. (2011)	17
Obr. 6. Schéma modelu v štúdiu Carlile et al. (2001)	21
Obr. 7. Návrh receptívnych polí neurónov v adaptačných modeloch	22
Obr. 8. Porovnanie predikcií jednotlivých modelov pre tri typy podmienok (Lingner et al., 2018)	23
Obr. 9. Výsledky pre experimenty v štúdiu Lingner et al. (2018).....	24
Obr. 10. Názočne zobrazenie jednotlivých stimulov	27
Obr. 11. Rozmiestnenie pozícií stimulov vo virtuálnom prostredí.....	28
Obr. 12. Rozmiestnenie pozícií stimulov v reálnom prostredí	29
Obr. 13. Štruktúra experimentu	31
Obr. 14. Rozmiestnenie v experimentálnej miestnosti (Piková, 2018)	32
Obr. 15. Príklad kombinácii premietaných na páse (Piková, 2018)	32
Obr. 16. Fotografia použitia tracker Polhemus LIBERTY (Piková, 2018)	33
Obr. 17. Príklad BRIR funkcie	35
Obr. 18. Odchýlky pri lokalizácii targetov	43
Obr. 19. Odchýlky pri lokalizácii targetov vzhľadom na baseline	45
Obr. 20. Odchýlky v priebehu kola pre trojicu targetov	48
Obr. 21. Odchýlky v priebehu kola spriemerované cez trojicu targetov	49
Obr. 22. Odchýlky pri predchádzajúcom type stimulu target alebo adaptor	51
Obr. 23. Štandardná odchýlka v reálnom prostredí s predchádzajúcim adaptor stimulom	53
Obr. 24. Štandardná odchýlka v reálnom prostredí s predchádzajúcim target stimulom	53
Obr. 25. Štandardné odchýlky vo virtuálnych prostrediach	54
Obr. 26. Štandardné odchýlky vzhľadom na baseline	56
Obr. 27. Korelácie medzi odpoveďami participantov a reálnou pozíciou targetu.....	57
Obr. 28. Hodnota informačného prenosu pre trojicu targetov	59

Úvod

Je dôležité skúmať a vyhodnocovať mechanizmy v našom organizme a najmä v našom mozgu. Čím viac informácii sa dozvieme o procesoch, ktorými napríklad prechádza zvuk pri spracovávaní od zdroja až po uvedenie si, čo sme práve počuli, tým lepšie budeme vedieť zreprodukovať tieto procesy. Či už v lekárskej oblasti alebo digitálnej. Diplomová práca sa venuje zvukom, presnejšie lokalizácii zvukov.

Vedieť lokalizovať zdroj zvuku je veľmi dôležité pre ľudí, ale taktiež aj pre zvieratá. Umožňuje nám to upriamiť pozornosť na daný objekt alebo hovoriaceho človeka, alebo naopak, varuje nás a upozorňuje pred možným nebezpečenstvom (Moore, 2003).

V rámci tejto práce sa budeme zaoberať lokalizačným efektom, ktorý sa nazýva „Kontextuálna plasticita“. Podobné efekty pri lokalizácii boli popísané už v 20. storočí, no kontextuálna plasticita bola pozorovaná až v roku 2007 (Kopčo et al., 2007). Efekt bol pozorovaný pri prehrávaní dvoch typov stimulov. Jeden stimul bolo potrebné lokalizovať a bol prehrávaný z viacerých miest. Budeme ho nazývať target. Druhý bol prehrávaný pred targetom a z rovnakého miesta. Nazveme ho adaptačný stimul a tento stimul nebolo potrebné lokalizovať. Targety mohli byť prehrávané po distraktore alebo iba samostatne a adaptačný stimul spôsobil určité chyby/odchýlky pri lokalizácii target stimulov, ktoré boli prehrávané po distraktore, ale aj keď boli prehrávané samostatne. Ak aj participanti lokalizovali targety s miernou chybou, pri prehrávaní adaptačného stimulu sa tieto chyby zväčšili. To znamená, že participanti lokalizovali zvuky s menšou presnosťou. Efekt, ktorý spôsobuje tieto odchýlky je práve kontextuálna plasticita. Výsledky experimentov ukazujú, že tento efekt ľuďom pri lokalizácii nepomáha, práve naopak, spôsobuje chybnú lokalizáciu prehrávaného zvuku. Táto práca vznikla aj preto, aby sme kontextuálnu plasticitu lepšie opísali a pochopili.

Podobná adaptácia pri lokalizácii bola opísaná aj v štúdiu Lingner et al. (2018). Štúdia ukazuje, že vznikajú určité chyby v lokalizácii, ale vďaka tomu sa naše rozlišovanie zvukov, ktoré sú prehrávané blízko pri sebe, zlepšuje. V rámci tejto práce porovnáваме kontextuálnu plasticitu s adaptačnými modelmi a zistíme, či majú spôsobené odchýlky určitý zmysel, napríklad zlepšenie rozlišovania blízkych zvukov.

1 Ciele

Čiastkové ciele pri vypracovaní diplomovej práce boli nasledovné:

- Vypracovať prehľad doterajšieho výskumu týkajúceho sa kontextuálnej plasticity
- Pripraviť prehľad vykonaných experimentov o kontextuálnej plasticite
- Na základe poskytnutých MATLAB skriptov naprogramovať experimentálnu procedúru na zber dát
- Nazbierať experimentálne dáta na nových subjektoch
- Analyzovať a vyhodnotiť experimentálne dáta
- Vyhodnotiť dáta v kontexte modelov adaptácie priestorového sluchu navrhnutých v štúdií Carlile et al. (2001) a Lingner et al. (2018)

V predchádzajúcich štúdiách bola kontextuálna plasticita pozorovaná, ak sa participanti aktívne zapájali pri počúvaní kontextu. Súčasný experiment bol zameraný na sledovanie kontextuálnej plasticity pri podmienke, že participanti iba pasívne počúvajú kontext.

Taktiež experimenty, ktoré skúmali kontextuálnu plasticitu boli vykonané v reálnom reverberantnom alebo reálnom anechoickom prostredí a súčasný experiment skúmal kontextuálnu plasticitu vo virtuálnom prostredí.

V rámci práce bola kontextuálna plasticita porovnávaná v kontexte adaptačných modelov Carlile et al. (2001) a Lingner et al. (2018). Modely predikujú určité výsledky pre lokalizáciu po adaptácii a v práci bola lokalizácia ovplyvnená kontextuálnou plasticitou porovnávaná s predikovanými výsledkami.

2 Prehľad z oblasti priestorového sluchu

2.1 Lokalizácia zvukov

Vedieť lokalizovať zdroj zvuku je veľmi dôležité pre ľudí, ale taktiež aj pre zvieratá. Umožňuje nám to upriamiť pozornosť na daný objekt alebo hovoriaceho človeka alebo naopak, varuje nás a upozorňuje pred možným nebezpečenstvom. Polohu zvuku určíme skombinovaním signálov, ktoré prichádzajú do oboch uší. Čiastočná lokalizácia je možná aj na základe signálov iba z jedného ucha. V čase digitálnych technológií je možné počúvať zvuky aj cez slúchadlá, vtedy sa nám zdá, akoby zvuk prichádzal zvnútra našej hlavy. V takejto situácii hovoríme o lateralizácii (angl. lateralization) (Moore, 2003).

Ak zvuk prichádza z pravej strany, do pravého ucha príde o niekoľko mikrosekúnd skôr ako do ľavého a taktiež príde s inou intenzitou. Na určenie tohto oneskorenia a zníženia intenzity používame **akustické charakteristiky, nazývané aj kľúče** (Moore, 2003):

- Interaurálny rozdiel v čase (angl. interaural time difference)
- Interaurálny rozdiel v intenzite (angl. interaural level difference)

Interaurálny rozdiel v čase označuje časový rozdiel, s ktorým príde ten istý zvuk do ľavého a pravého ucha. Ak zvuk prišiel skôr do ľavého ucha, identifikujeme zdroj zvuku na ľavej strane.

Interaurálny rozdiel v intenzite určuje rozdiel v hlasitosti zvuku, ktorý príde do nášho ľavého a pravého ucha. K zmene hlasitosti dochádza v dôsledku toho, že naša hlava tvorí takzvaný akustický tieň.

Rozdiel v čase môže byť maximálne $690\mu\text{s}$ a táto hodnota sa nadobúda, ak zvuk prichádza z polohy práve oproti jednému z uší. Rozdiel v intenzite môže dosahovať pri vysokých frekvenciách hodnotu až 20dB. Rozdiel v čase je užitočnejší na lokalizáciu zvuku pri nízkych frekvenciách, a naopak, rozdiel v intenzite je užitočnejší pri vysokých frekvenciách.

Často používané pojmy v oblasti lokalizácie zvukov sú (Moore, 2003):

- Monaurálny zvuk
- Binaurálny zvuk
- Diotický zvuk
- Dichotický zvuk

Monaurálny označuje situáciu, keď zvuk prichádza iba do jedného ucha.

Binaurálny znamená, že zvuk prichádza do oboch uší.

Diotický pomenúva situáciu, keď zvuk, ktorý prichádza do oboch uší, je rovnaký. Tento zvuk nemá interaurálny rozdiel v čase ani v intenzite.

Dichotický, naopak, označuje situáciu, keď zvuk, ktorý prichádza do oboch uší, je rozdielny.

Polohu zdroja zvuku určujeme vzhľadom na polohu hlavy (Moore, 2003). Na označenie presnej polohy používame tri roviny (Obr. 1):

- Horizontálna rovina
- Frontálna rovina
- Mediálna rovina

Horizontálna rovina prechádza cez horné okraje vstupov do zvukovodov a cez dolné okraje očných jamiek.

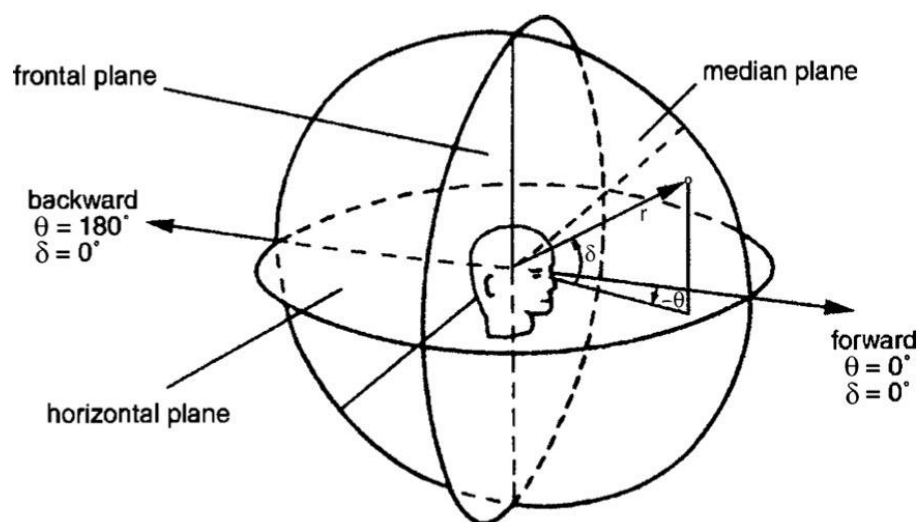
Frontálna rovina je kolmá na horizontálnu, tak že ju pretína v časti horných okrajov vstupov do zvukovodov.

Mediálna rovina je kolmá na horizontálnu aj frontálnu rovinu a vzdialenosť od oboch uší je rovnaká.

Všetky tri roviny sa pretínajú presne v strede hlavy. Smer, z ktorého zvuk prišiel, určujeme pomocou **azimutu**, čo je uhol, ktorý vznikol projekciou do horizontálnej roviny a **elevácie**, čo je uhol, ktorý vznikol projekciou do mediálnej roviny. Azimut 0° je priamo pred tvárou poslucháča. V tejto práci sa jeho hodnota zvyšuje smerom doprava po horizontálnej rovine. Hodnotu 90° teda nadobúda rovno oproti pravému uchu. Pre posun smerom doľava používame záporné hodnoty, teda oproti ľavému uchu bude mať azimut

hodnotu -90° . Hodnoty azimutu je možné meniť aj iným spôsobom. Pre body, ktoré ležia na horizontálnej rovine je elevácia 0° . Jej hodnota sa zvyšuje smerom nad hlavu poslucháča. Hodnotu 90° dosahuje nad hlavou poslucháča a 270° pod hlavou poslucháča. Ďalej na určenie polohy zdroja zvuku používame aj **vzdialenosť**.

Najväčšiu presnosť pri lokalizovaní polohy zvuku dosahujeme v horizontálnej rovine. Menšiu presnosť dosahujeme pre eleváciu a najhoršiu pre vzdialenosť. Zlepšiť presnosť lokalizácie zvuku vieme skombinovaním informácie pre sluchový systém a informácie z vizuálnych podnetov (Moore, 2003).



Obr. 1. Náčrt rovín, ktoré používame pri určovaní polohy zvuku (Moore, 2003)

Pri lokalizácii zvukov skúmame dva aspekty. Prvým aspekt je, ako veľmi sa skutočná poloha zdroja zvuku líši od vnímanej polohy. To znamená polohy, ktorú sme po spracovaní údajov určili ako zdroj zvuku. Druhým aspektom je, ako dobre vie poslucháč lokalizovať aj malé posuny v polohe zdroja zvuku. Tento aspekt meria citlivosť (angl. resolution) sluchového systému. Najmenší posun (angl. minimum audible angle), ktorý je človek schopný rozlíšiť, sa označuje MAA (Moore, 2003).

V klasickej miestnosti zvuk, ktorý je prehrávaný napríklad z reproduktorov, ku nám prichádza viacerými spôsobmi. Určitý zvuk prichádza priamo do našich uší, no väčšina prichádza až po jednom alebo viacerých odrazoch od stien, podlahy a predmetov

v miestnosti. Tieto odrazy si ani neuvedomujeme, aj keď majú na lokalizáciu daného zvuku určitý efekt. Napriek týmto odrazom, sme schopní presne lokalizovať zdroj zvuku (Moore, 2003).

Dôležitý efekt spomínaný v oblasti priestorového sluchu je precedenčný efekt (angl. precedence effect), ktorý autor v literatúre (Moore, 2003) vysvetľuje pri porovnávaní výsledkov z dvoch experimentov. Experimenty sú zamerané na sluchový systém a na to, ako spracováva zvuky a ich ozveny. V experimente sa používajú zvuky prehrávané z okolia aj zvuky prehrávané pomocou slúchadiel. Ak je zvuk prezentovaný cez slúchadlá, skladá sa z dvoch párov kliknutí, kde každý pár kliknutí je prehrávaný do jedného ucha. Doba medzi prehratím prvého páru a druhého sa líšila a taktiež sa líšilo oneskorenie pri prehrávaní druhého kliknutia z páru.

Precedenčný efekt je efekt, ak postupné zvuky, v tomto prípade kliknutia, participant počuje ako jeden celistvý zvuk. Tento efekt znižuje schopnosť detegovať posuny v lokalizácii oneskoreného zvuku, ktorý reprezentuje ozvenu, na krátky čas po nástupe prvého zvuku. Precedenčný efekt však nepotláča úplnú informáciu o ozvene. Participanti sú schopní počuť rozdiel medzi prezentovaným zvukom s ozvenou a zvukom bez ozveny.

2.1.1 Smerová prenosová funkcia

Zdroj zvuku, prostredie v ktorom sa zvuk šíri (poslucháč, steny a objekty v prostredí) a ucho tvoria lineárny systém, ktorý transformuje vstupný signál (zdrojom vygenerovaný zvuk) na výstupný signál (zvuk, ktorý je zaznamenaný uchom poslucháča). Tento systém je možné matematicky charakterizovať jeho impulznou odozvou, nazývanou smerová prenosová funkcia (angl. Head-Related Transfer Function, HRTF) (Kopčo, 2009). Táto funkcia poskytuje informácie o tom, ako sa zmení zvuk, ktorý vychádza z konkrétneho miesta, kým príde do uší poslucháča. Pre každú polohu zdroja zvuku existuje HRTF. Akýkoľvek zvuk vygeneruje zdroj, HRTF popíše cestu a zmenu, ktorou prejde. Pre danú polohu zdroja existuje pravá a ľavá HRTF, ktorá popisuje aký zvuk prišiel do pravého a ľavého ucha. Pár HRTF môžeme použiť na vytvorenie virtuálnych stimulov, ktoré simulujú reálne prostredie. HRTF spolu s odrazmi od stien, podlahy a objektov v prostredí je uložená v BRIR funkcii (binaural room impulse response function).

2.2 Kontextuálna plasticita a predchádzajúce experimenty

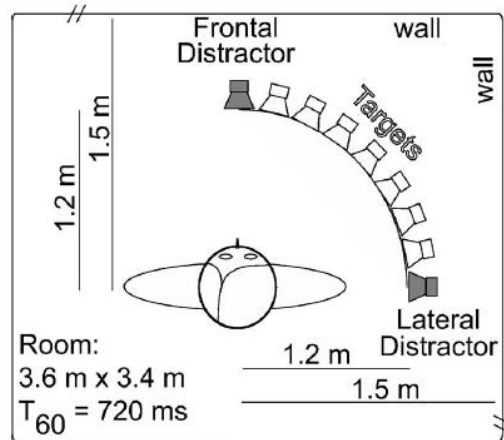
Na skúmanie lokalizácie bolo zameraných už viacero experimentov. Väčšina z nich pozorovala ako zvuk, ktorý nazývame distraktor, ovplyvňuje lokalizáciu zvukov, ktoré nazývame targety. Distraktor je adaptačný stimul, ktorý prichádzal z rovnakej pozície v priebehu kola. Targety v priebehu kola prichádzali z rôznych pozícií a participanti lokalizovali ich pozície. Prítomnosť distraktora lokalizáciu targetov ovplyvňovala určitým spôsobom a štúdie zamerané na kontextuálnu plasticitu skúmali do akej miery bola lokalizácia cieľových targetov ovplyvnená a aké podmienky k tomu prispievali.

V rámci štúdie Thurlow a Jack (1973) boli vykonané viaceré experimenty, ktoré boli zamerané na sledovanie lokalizácie zvukov po predchádzajúcom prehraní adaptačných stimulov. V prvom experimente sledovali ako predchádzajúci adaptačný stimul ovplyvňuje lokalizáciu zvuku, ktorý je priamo pred participantmi. Adaptačný stimul mal v prvom experimente interaurálne časové rozdiely a v druhom experimente mal interaurálne rozdiely v intenzite. Ďalšie experimenty boli určitou obmenou prvého a druhého experimentu. Výsledky ukázali, že lokalizácia prehrávaného zvuku bola posunutá väčšinou v smere od adaptačného stimulu a lokalizačné adaptačné efekty môžu byť vyvolané interaurálnymi rozdielmi v čase alebo v intenzite (Thurlow a Jack, 1973).

Štúdia z roku 2007 Kopčo et al. (2007) skúmala ako distraktor, ktorý prichádza zo známej pozície, ovplyvňuje lokalizáciu targetu, ktorý nasleduje po distraktore. V rámci štúdie boli vykonané dva experimenty. Jeden experiment bol vykonaný v bežnej miestnosti a druhý v anechoickej komore.

Participant na experimente mali lokalizovať target klik, ktorý bol prezentovaný pre každý zo 7 reproduktorov, ktoré sú zobrazené na obrázku bielou farbou (Obr. 2). Target klik bol 2-ms širokospektrálny šum a distraktor klik bol identický s target klikom. Target nasledoval za distraktorom, ktorý prichádzal z rovnakej pozície počas celého kola. Jeho pozície sú na obrázku znázornené sivou farbou. Časový interval medzi prezentáciou distraktora a targetu sa líšil pre jednotlivé podmienky. Spolu bolo 6 možných podmienok. Päť podmienok s rôznou hodnotou časového intervalu - 25, 50, 100, 200, 400 ms a jedna kontrolná podmienka, kde bol prezentovaný iba target stimul.

Obidva experimenty pozostávali zo štyroch 30 minútových blokov, medzi ktorými bola prestávka. V rámci každého bloku boli 4 kolá.



Obr. 2. Umiestnenie reproduktorov v experimente Kopčo et al. (2007)

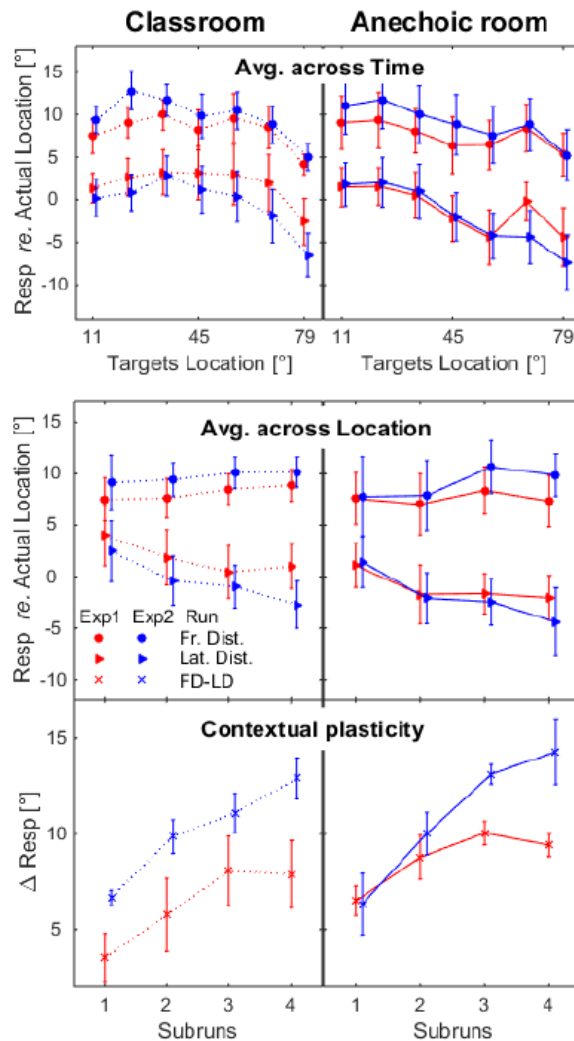
V experimentoch sa realizovalo jedno kolo pre každú z týchto kombinácií:

- Smerovanie participanta na frontálny distraktor a prezentácia frontálneho distraktora
- Smerovanie participanta na frontálny distraktor a prezentácia laterálneho distraktora
- Smerovanie participanta na laterálny distraktor a prezentácia frontálneho distraktora
- Smerovanie participanta na laterálny distraktor a prezentácia laterálneho distraktora

V každom kole sa opakovalo 6 podmienok (5 podmienok pre rôzne hodnoty časového intervalu medzi distraktorom a targetom a jedna kontrolná podmienka, kde distraktor prehrávaný nebol). Participanti mali oči v priebehu kola zatvorené a boli požiadaní, aby ukazovadlom, ktoré snímalo polohu, lokalizovali vnímanú polohu zdroja. Pri potvrdení odpovede sa hodnota uložila vo forme karteziánskych súradníc.

Obr. 3 zobrazuje výsledky experimentu. V hornom paneli sú zobrazené odchýlky pri kontrolnej podmienke v klasickej a anechoickej miestnosti. V strednom paneli je zobrazený vývin kontextuálnej plasticity ako funkcia subrunov pre samostatné target

trials spriemerované cez pozície targetov. Spodný panel ukazuje rozdiely v odpovediach subjektov pre kolá s frontálnym distraktorom a pre kolá s laterálnym distraktorom.



Obr. 3. Vplyv kontextuálnej plasticity na lokalizáciu targetov (Kopčo a Andrejková, 2020)

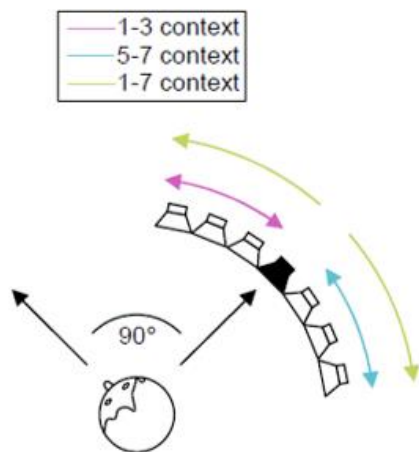
Prezentácia distraktora spôsobila odchýlku pri lokalizovaní targetu a odchýlka mala určitý trend, ktorý sa líšil medzi normálnou a anechoickou miestnosťou. Distraktor taktiež spôsobil, že odpovede participantov boli posunuté v smere od distraktora a tento posun pretrvával aj pre kontrolné stimuly, v ktorom distraktor už prehrávaný nebol. Kontextuálna odchýlka bola vyvinutá nanovo v každom kole, ktoré trvalo priemerne 5 až 6 minút.

Rôzne trendy pre reverberantné a anechoické prostredie ukazujú, že lokalizácia zvuku je dynamický proces, ktorý závisí od kontextu a od úrovne reverberácie v miestnosti,

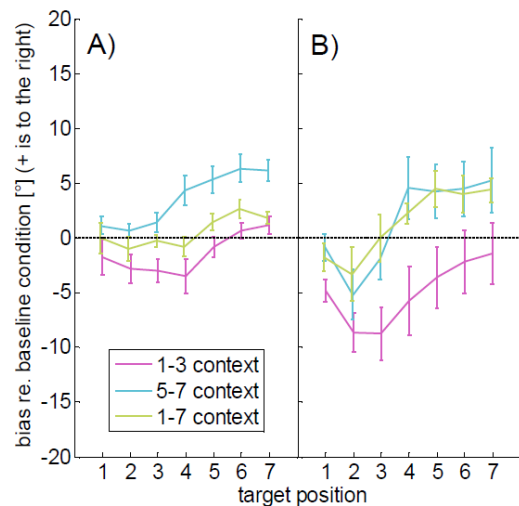
a taktiež interakcia medzi zvukmi, ktoré po sebe nasledujú, nastáva v časovom horizonte od pár stoviek milisekúnd až po pár minút (Kopčo et al., 2007).

Experimenty v štúdiu Kopčo et al. (2007) ukázali, že prítomnosť distraktora spôsobila odchýlky pri lokalizácii targetov a odchýlky pretrvávali aj pre kontrolné kolá, kde bol prehrávaný už iba samotný target stimul. Tieto odchýlky pri lokalizácii targetov nazývame „**kontextuálna plasticita**“ (Tomoriová et al. 2011).

Štúdia Tomoriová et al. (2011) skúmala priestorové aspekty kontextuálneho efektu tým, že menila priestorové usporiadanie kontextu. Stimuly v experimente a jeho priebeh bol vo veľkej miere rovnaký s experimentom v štúdiu Kopčo et al. (2007). Rozdiel bol v tom, že distraktor bol prezentovaný zo stredného reproduktora, časový interval medzi prehraním distraktora a targetu bol 25ms a 25% experimentálneho kola pozostávalo z prezentácie samotných target stimulov (nedistraktorový trial). V baseline kole boli prehrávané iba target stimuly.



Obr. 5. Rozmiestnenie experimentu v štúdiu Tomoriová et al. (2011)



Obr. 4. Výsledky experimentu (Tomoriová et al., 2011)

Experimentálne kolá slúžili na skúmanie toho, ako je kontextuálna plasticita ovplyvnená distribúciou targetov, ktoré nasledovali za distraktorom. V experimentálnych kolách boli targety prezentované buď z troch ľavých reproduktorov, troch pravých reproduktorov

alebo z jedného z nedistraktorových reproduktorov. Participant bol otočený buď priamo na stredný reproduktor alebo bol otočený kolmo na tento reproduktor. Možné natočenie a prezentácie targetov sú zobrazené na obrázku (Obr. 5). Čierny reproduktor prehrával distraktor stimuly. Experiment bol vykonaný v zvukotesnej komore veľkosti 3 x 2 x 3.1 m.

Na obrázku (Obr. 4) sú znázornené odchýlky pri lokalizovaní targetov. Panel A ukazuje výsledky pre kolá, keď bol participant otočený na distraktor reproduktor a panel B ukazuje výsledky pre kolá, v ktorých bol participant natočený kolmo na distraktor. Odchýlky boli prítomné pre obe pozície participanta a boli v smere od distraktora. Reproduktory 5 až 7 boli lokalizované s odchýlkou v smere doprava od reálnej pozície targetu a reproduktory 1 až 3 boli lokalizované v smere doľava. Odchýlky záviseli od konfigurácie distraktorových trialov. Pre konfigurácie, kde bol target prehrávaný pre 3 ľavé alebo 3 pravé reproduktory, boli odchýlky prítomné práve v zodpovedajúcej časti reproduktorov, avšak pri druhej trojici reproduktorov boli odchýlke menšie alebo žiadne. Ak boli targety prezentované zo všetkých reproduktorov, boli pozorované malé odchýlky v celom rozsahu reproduktorov.

Tieto výsledky poskytujú základné charakteristiky neurálnej štruktúry, ktoré sa podrobujú kontextuálnej adaptácii, a ktoré popisujú ako priestorové usporiadanie kontextu ovplyvňuje kontextuálnu plasticitu.

Štúdia Kopčo et al. (2015) porovnávala kontextuálny efekt pri 3 rôznych formách odpovedania:

- zatvorené oči a lokalizovanie zvuku ukazovadlom
- otvorené oči a lokalizovanie zvuku ukazovadlom
- otvorené oči a lokalizovanie pomocou kombinácie zadanej klávesnicou

V rámci štúdie boli vykonané 2 experimenty. Prvý experiment prehrával distraktor a target s časovým intervalom 400ms a druhý s časovým intervalom 25ms. Priebeh experimentov je podobný priebehu experimentov v štúdiu Kopčo et al. (2007), avšak distraktor bol prehrávaný iba z frontálneho reproduktora.

Výsledky experimentov ukázali, že odchýlky v lokalizácii súvisiace s kontextom nie sú eliminované, ak sa zmení spôsob odpovedania. Nezáleží na tom, či majú participantí oči otvorené alebo zatvorené a či potrebujú lokalizovať zvuky ukazovadlom. Navyše sa

ukázalo, že odpovedanie pomocou klávesnice je presnejšie ako lokalizovanie ukazovadlom.

V štúdií Hládek et al. (2017) zaoberajúcej sa kontextuálnom plasticitou boli vykonané dva experimenty. Prvý experiment skúmal rôzne typy kontextuálnych prezentácií a rôzne časové intervaly medzi distraktorom a targetom. Druhý experiment nahradil distraktor s jedným klikom, ktorý sa používal v predchádzajúcich štúdiách, za distraktor pozostávajúci z ôsmich klikov alebo zvukom, ktorý trval rovnako dlho ako distraktor s ôsmymi klikmi. Výsledky z prvého experimentu ukázali, že kontextuálny posun v lokalizácii narástol so zvyšujúcim sa pomerom kontextu v kole experimentu a bol závislý od časových intervalov medzi prehratím distraktora a targetu. Výsledky pre druhý experiment ukazujú, že distraktor s ôsmymi klikmi spôsobil väčší posun v lokalizácii než distraktor s jedným klikom, no zvuk, ktorý mal rovnakú dĺžku ako distraktor s ôsmymi klikmi spôsobil iba malý posun v lokalizácii (Hládek et al., 2017).

Štúdia Kopčo et al. (2015) skúmala efekt predchádzajúcich stimulov na lokalizáciu targetov. Vykonané experimenty v rámci štúdie skúmali, či perцепčná organizácia súvisí s efektom, ktorý ovplyvňuje lokalizáciu targetov, keď je predtým prehrávaný distraktor stimul. V rámci experimentov bol prehrávaný distraktor s jedným klikom a target s krátkym časovým rozstupom, aby tvorili skupinu zvukov alebo bol prehrávaný distraktor s ôsmymi klikmi v osobitnom „prúde“ zvukov ako nasledujúci target stimul. Kolá v experimente pozostávali z 5 druhov trialov. Mohol byť prehrávaný iba target, distraktor s jedným klikom a 50ms časovým rozstupom medzi distraktorom a targetom, distraktor s jedným klikom a časový rozstup bol 200ms, distraktor s ôsmymi klikmi a 50ms rozstupom alebo distraktor s ôsmymi klikmi a 200ms rozstupom. Efekt, ktorý bol vyvolaný prítomnosťou distraktora s jedným klikom sa zmenšil, ak bol distraktor nahradený distraktorom s ôsmymi klikmi. Celkovo sa efekt zmenšil, ak prehrávaný distraktor a target neboli vnímané ako skupina zvukov. Výnimkou je frontálny distraktor, kde distraktor s ôsmymi klikmi vyvolal určité odchýlky, no odchýlky neboli vyvolané, ak bol prezentovaný distraktor s jedným klikom (Kopčo et al., 2015).

Štúdia Kopčo a Andrejková (2020) bola založená na analýze a modelovaní kontextuálnych dát zo štúdie Kopčo et al. (2007) a Kopčo et al. (2017). Okrem toho

vyšetrovala do akej miery posuny v odpovediach, ako sú navrhované v štúdiu Lingner et al. (2018), môžu vysvetliť kontextuálnu plasticitu. Výsledky ukazujú, že miera temporálneho posunu v odpovediach v experimentálnych kolách je úmerná laterálnemu posunu priemeru distribúcie stimulov. Posun citlivý na distribúciu môže vysvetliť až 45% pozorovanej kontextuálnej plasticity. Kontextuálna plasticita je pravdepodobne výsledkom kombinácie adaptačných procesov vo viacerých reprezentáciách priestorového sluchu, ktoré sú citlivé na distribúciu stimulov a iné faktory, ako napríklad ozveny v miestnosti.

Štúdia Piková (2018) bola o kontextuálnej plasticite v reálnom reverberantnom prostredí a skúmala do akej miery efekt kontextuálnej plasticity závisí od distribúcie stimulov. Výsledky ukázali, že nerovnomerná distribúcia stimulov spôsobuje vznik odchýlok v lokalizácii targetov v smere od distraktora, ktorý bol striedavo zakomponovaný medzi targety (Piková, 2018).

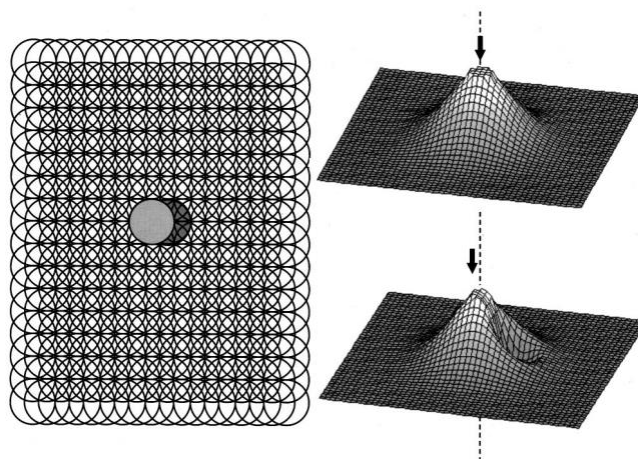
2.3 Adaptačné modely a s nimi súvisiace experimenty

Táto kapitola je zameraná na dva modely popisujúce adaptačné efekty pri lokalizácii zvukov u ľudských poslucháčoch. Prvý model bol predstavený v štúdiu Carlile et al. (2001) a druhý model bol predstavený v štúdiu Lingner et al. (2018). Tieto modely popisujú mechanizmy podobné kontextuálnej plasticite.

2.3.1 Carlile model

Autori v článku Carlile et al. (2001) uvádzajú, že štúdium afterefektov (angl. aftereffect) má rozsiahlu históriu. Afterefekt môžeme definovať ako perцепčné skreslenie, ktoré vznikne po vystavení sa adaptívnemu zmyslovému stimulu (Carlile et al., 2001). Veľá štúdiu sa zameriavalo na výskum afterefektov, predovšetkým, ak sa týkali vizuálneho afterefektu. Avšak už menej výskumov bolo zameraných na sluchové afterefekty.

V štúdiu Carlile et al. (2001) sa autori zamerali na sluchový afterefekt, ktorý sa viaže na priestorovú lokalizáciu zvukov a predstavili jednoduchý model (Obr. 6).

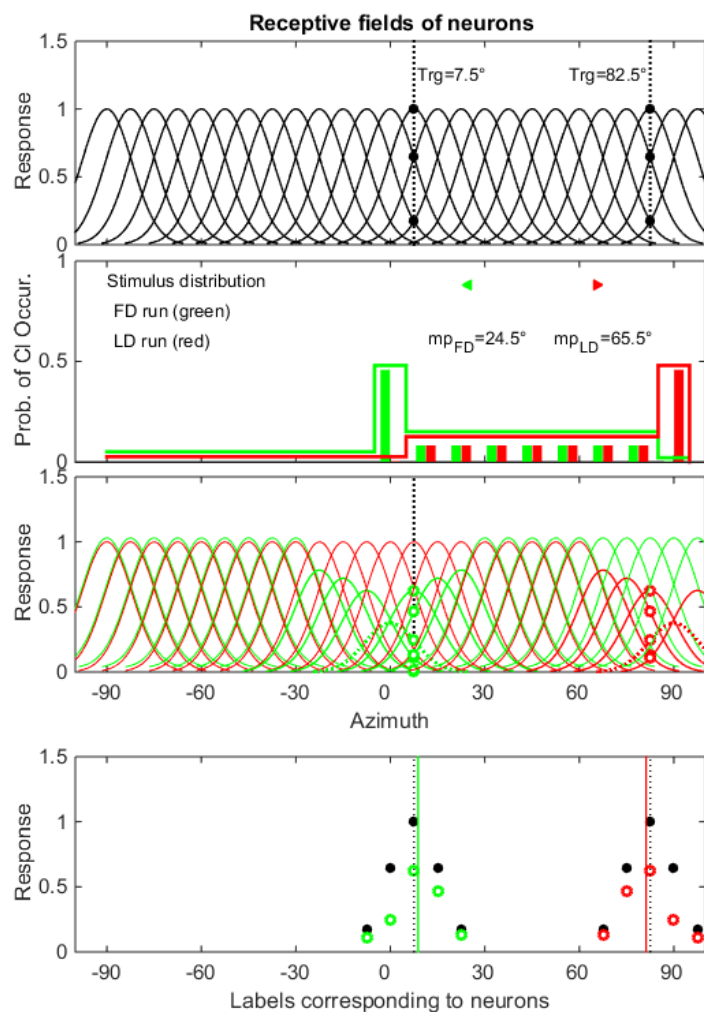


Obr. 6. Schéma modelu v štúdiu Carile et al. (2001)

Naľavo je zobrazený súbor prekrývajúcich sa kanálov, kde je zóna excitácie zobrazená svetlosivým kruhom a zóna predchádzajúcej adaptácie je zobrazená tmavosivým kruhom. Tento súbor je produkovaný rôznymi stimulmi, ktoré boli zamerané na jednotlivé kanály. Predpokladáme, že kanály majú tvar gausiánu. Napravo hore je výstup populácie v stave pred adaptáciou, kde šípka ukazuje priemerný výstup populácie. Vpravo dole je zobrazený výstup populácie po adaptácii. Dôležité je všimnúť si, že šípka ukazujúca priemerný výstup je posunutá v dôsledku adaptácie.

Obr. 7 zobrazuje návrh receptívnych polí neurónov, ktorý bol pripravený doc. Gabrielou Andrejkovou, PhD. a doc. Norbertom Kopčom, PhD.

V prvom riadku sú znázornené receptívne polia neurónov a odpovede, ak adaptor nie je prítomný. Druhý riadok zobrazuje polohy adaptorov na 0° a na 90° . Adaptory sú prezentované s 50% pravdepodobnosťou. Častou prezentáciou adaptoru a následnou aktivitou neurónov, dochádza ku „únavy“ neurónov. V treťom riadku sú zobrazené odpovede zelenou farbou, ak je prezentovaný frontálny adaptor a červenou farbou, ak je prehrávaný laterálny adaptor. Aktivita neurónov sa po adaptácii znížila v dôsledku „únavy“ a dochádzalo ku odchýlke, ktorá je znázornená v poslednom grafe zelenou vertikálnou čiarou. Čierna prerušovaná čiara znázorňuje polohu odpovedí, ak by adaptor prítomný nebol. Podobná situácia nastáva pri prezentovaní adaptoru na 90° .



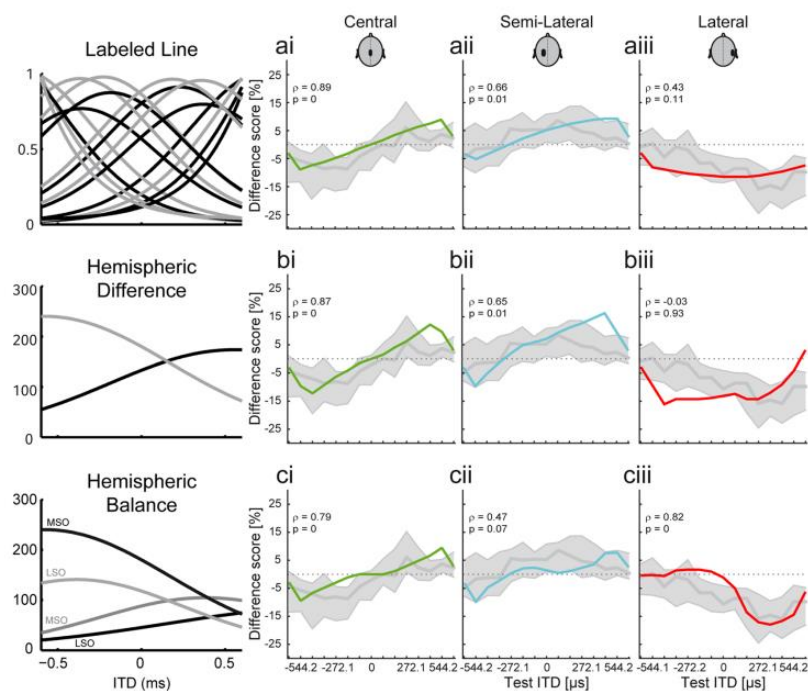
Obr. 7. Návrh receptívnych polí neurónov v adaptačných modeloch

2.3.2 Lingner model

Článok Lingner et al. (2018) predstavuje nový dekodovací model. Tento model sa nazýva hemisfericky balancovaný model (angl. Hemispheric balanced model), pretože používa nezávisle vypočítané výsledky pre lokalizáciu zvuku z oboch hemisfér, a následne tieto výsledky skombinuje. Model zachytáva absolútne chyby pri lokalizácii zvukov, ktoré vznikajú v dôsledku predchádzajúcich stimulov, a navyše predikuje selektívnu kompresiu a rozťahnutie percepčného priestoru.

Koncept daného modelu bol porovnaný so známymi konceptami modelov Labeled line (Jeffress, 1948) a Hemispheric difference (McAlpine et al., 2001). V rámci štúdie boli vykonané 2 experimenty. Výsledky z prvého experimentu a predikcie daných modelov

sú zobrazené na obrázku (Obr. 8). Výsledky zobrazené sivou farbou zobrazujú dáta z experimentu a krivky označené zelenou, modrou a červenou zobrazujú predikcie jednotlivých modelov. Predikcie modelov pre prvý a druhý stĺpec, ktoré sú označené ako *Central* a *Semi-lateral*, sa navzájom odlišovali iba mierne, a navyše popisovali reálne dáta relatívne dobre. Dôležitý rozdiel medzi novým modelom a známymi modelmi je viditeľný pri porovnávaní predikcií v treťom stĺpci, ktorý je označený ako *Lateral*. Modely Labeled line a Hemispheric difference mali rovnaké tendencie pre celý rozsah ITD (hodnoty na horizontálnej osi). Výsledky pre model Labeled line na začiatku klesli na -10%, po celý čas mali túto hodnotu a na záver opäť nadobudli hodnotu 0%. Výsledky pre model Hemispheric difference mali podobnú tendenciu. Na začiatku klesli na hodnotu -10% a na záver bola hodnota opäť 0%. Avšak Hemispheric balanced model predikoval určitú zmenu v tendencii. Po hodnotu ITD 0 μ s boli výsledky 0%, no potom postupne klesli na hodnotu -15% a na konci dosiahli hodnotu 0%.

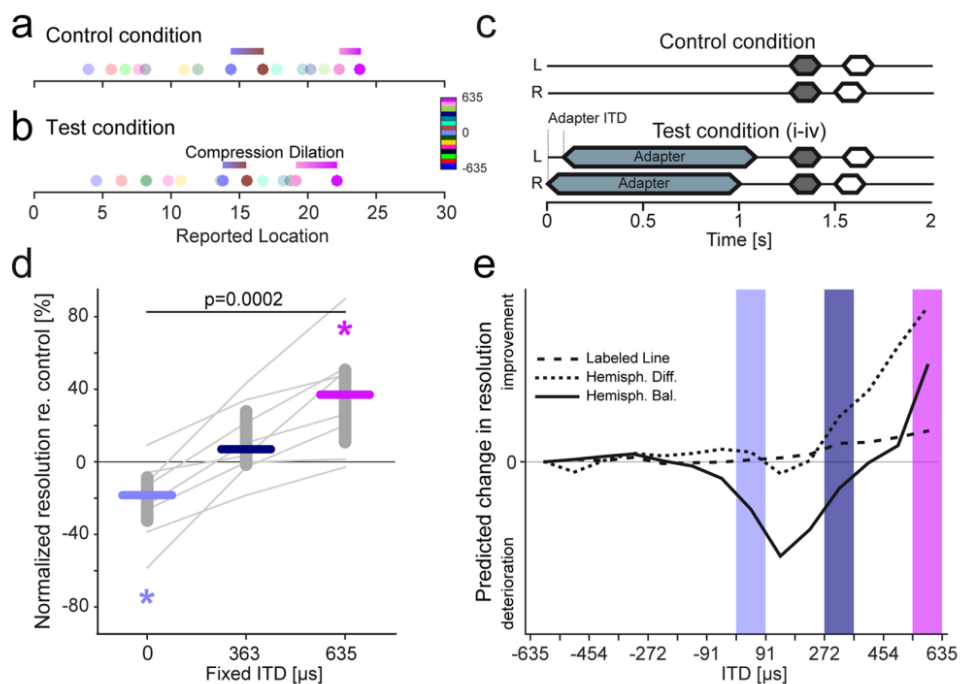


Obr. 8. Porovnanie predikcií jednotlivých modelov pre tri typy podmienok (Lingner et al., 2018)

V rámci prvého experimentu bola skúmaná aj citlivosť pri lokalizácii zvukov. Targety boli prehrávané s 15 rôznymi interaurálnymi rozdielmi v čase (ITD), a taktiež bol prehrávaný stimul nazývaný adaptor. Podstatným rozdielom medzi experimentami v štúdiu Carlile et al. (2001), našim experimentom a experimentami v rámci tejto štúdie

je používanie a simulovanie reálnej polohy ako kombinácie ITD a ILD, kým štúdia Lingner et al. (2018) používa iba ITD.

Stimuly target a adaptor boli prehrávané v 2 rôznych podmienkach. Jedna podmienka bola kontrolná, kde boli prehrávané iba targety a druhá podmienka bola testovacia, kde bol prehrávaný adaptor a za ním nasledoval target. Názorne je to ukázané na Obr. 9c. Na Obr. 9a je znázornená distribúcia targetov ako ich počuli subjekty, ak nebol prehrávaný adaptor (v kontrolnej podmienke) a na Obr. 9b je znázornená distribúcia targetov ako ich lokalizovali subjekty, ak bol pred targetmi prehrávaný aj adaptor (v testovacej podmienke). Dôležitým výsledkom je rozdiel distribúcie targetov pri opísaných 2 podmienkach, ktorý je zvýraznený horizontálnymi prúžkami v časti *a* a *b* (Obr. 9). Prítomnosť adaptoru zmenila distribúciu targetov. V kontrolnej podmienke bola distribúcia pre stredné targety väčšia a pre targety na pravej strane menšia. Avšak pri prehrávaní adaptoru na pravej strane sa distribúcia pre pravé targety zväčšila a pre stredné targety zmenšila. Tieto výsledky hovoria o rozťahnutí a kompresii percepčného priestoru. Rozťahnutie percepčného priestoru znamená, že participanti sú schopní rozlíšiť aj malé rozdiely v polohe dvoch stimulov, a naopak, kompresia percepčného priestoru znamená, že participanti nie sú schopní rozlíšiť malé rozdiely v polohe dvoch stimulov a majú pocit, že stimul bol prehrávaný z rovnakého miesta.



Obr. 9. Výsledky pre experimenty v štúdiu Lingner et al. (2018)

V druhom experimente boli použité targety s 3 rôznymi hodnotami ITD. Ide o rozdiel $0\mu\text{s}$, $363\mu\text{s}$ a $635\mu\text{s}$ ako je znázornené na horizontálnej osi (Obr. 9d). Hodnota $-635\mu\text{s}$ bola použitá ako referencia. Pozitívne hodnoty na vertikálnej osi sú interpretované ako zvýšenie citlivosti na polohu stimulov, čiže ako rozťahnutie percepčného priestoru a negatívne hodnoty sú interpretované ako kompresia percepčného priestoru. Na Obr. 9d sa citlivosť zvýšila pre rozdiel v čase s hodnotou $635\mu\text{s}$, blízko prezentovaného adaptora, a pre hodnotu $0\mu\text{s}$ sa citlivosť zhoršila. Predikcie troch modelov Labeled line, Hemispheric difference a Hemispheric balanced sú zobrazené na Obr. 9e. Všetky tri modely predikovali zlepšenie citlivosti smerom ku hodnote $635\mu\text{s}$, aj keď Labeled line model predikoval iba mierne zlepšenie, no jedine Hemispheric balanced model zaznamenal pokles okolo hodnoty $0\mu\text{s}$, ako ukazujú aj reálne dáta z experimentu (Obr. 9d).

Hemispheric balanced model najlepšie z predstavených 3 modelov popisuje reálne dáta a prítomnosť adaptora zlepšuje citlivosť na polohu stimulov v blízkosti adaptora.

2.3.3 Zhrnutie a hypotéza

Prvý model hovorí o adaptácii ako o „únave“, ktorá je spôsobená zvýšenou aktiváciou a táto únava má za následok zníženie odpovedí v priestorových kanáloch v blízkosti adaptora. Druhý model popisuje adaptáciu ako prispôbenie sa priestorovej reprezentácie, aby sa zlepšila separácia zvukov, aj keď to spôsobuje určité odchýlky v lokalizácii. Z týchto model vychádzajú dve opačné predikcie pre výsledky lokalizácie po adaptácii. Prvý model predikuje zhoršenú lokalizáciu pre targety blízko adaptora a druhý model predikuje zlepšenie separácie zvukov v blízkosti adaptora.

Na základe výsledkov v štúdií Kopčo et al. (2007) predpokladáme, že kontextuálna plasticita je podobná viac modelu predstavenému v Carlile et al. (2001), pretože výsledky ukázali zvýšenie štandardnej odchýlky. To znamená zvýšenie variability v lokalizácii targetov v blízkosti distraktora. Taktiež predpokladáme, že „únava“ predstavená v prvom modeli spôsobí zvýšenie šumu v neurálnej reprezentácii polohy (keďže odozvy neurónov sú slabšie), a preto sa štandardná odchýlka zvýši.

3 Návrh experimentu

Experiment bol zameraný na kontextuálnu plasticitu vo virtuálnom prostredí. Bol založený na experimente, ktorý je popísaný v bakalárskej práci Linková (2020), ale bol vykonaný v experimentálnej zvukotesnej miestnosti a líšil sa aj spôsobom odpovedania. Taktiež bol podobný experimentu, ktorý skúmal kontextuálnu plasticitu v reálnom prostredí v práci Piková (2018). Pri vyhodnocovaní kontextuálnej plasticity v kontexte adaptačných modelov boli použité aj dáta z experimentu pre reálne prostredie. Keďže bola štruktúra experimentov podobná, opísaný návrh je pre experiment vo virtuálnom prostredí, no uvedené sú aj časti experimentu v reálnom prostredí, kde sa tieto experimenty navzájom odlišovali.

Na experimente vo virtuálnom prostredí sa zúčastnilo 10 participantov a na experimente v reálnom prostredí sa zúčastnilo 8 participantov. Všetci absolvovali experiment dobrovoľne a podpísali informovaný súhlas. Taktiež boli každému účastníkovi audiometricky vyhodnotené prahy počutia a všetci mali výsledky v norme.

V experimente bola kontextuálna plasticita skúmaná vo virtuálnom prostredí. To znamená, že stimuly boli prehrávané participantom cez slúchadlá. Aby prezentované zvuky zodpovedali reálnemu prostrediu, použili sme simuláciu založenú na BRIR funkciách, ktoré poskytujú pre konkrétnu polohu zdroja zvuku informácie o ozvenách a transformáciách, ktorými prejde zvuk, kým príde od zdroja po ucho participanta.

Stimuly boli upravené aby simulovali dve virtuálne prostredia:

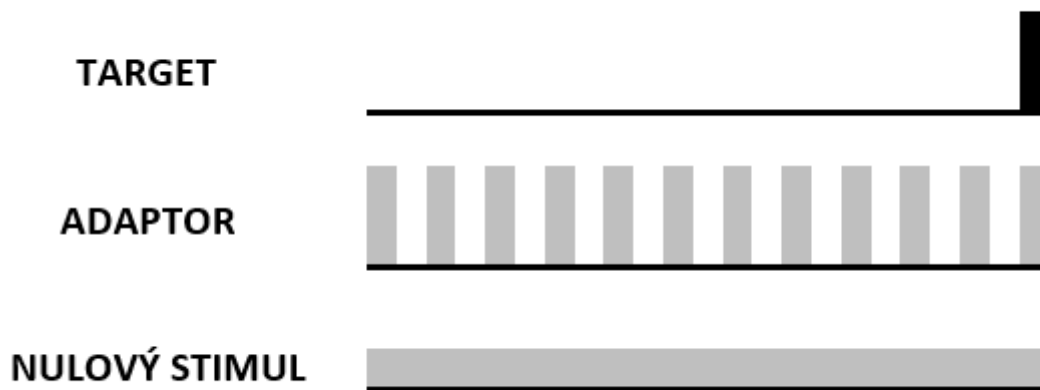
- REVERBERANTNÉ
- ANECHOICKÉ

V reverberantnom prostredí boli prítomné ozveny od stien a objektov v miestnosti a v anechoickom prostredí bol prehrávaný iba priamy zvuk, ktorý prichádzal od zdroja k participantovi.

3.1 Štruktúra experimentu

V priebehu experimentu boli prehrávané tieto typy stimulov:

- **Target** - 2-ms klik, ktorý mali poslucháči lokalizovať.
- **Adaptor** - séria 12 2-ms klikov, ktoré poslucháči nelocalizovali, len si ich vypočuli, potvrdili prehratie stlačením „Enter“ a nasledoval ďalší stimul.
- **Nulový** stimul - prehrávané „ticho“. Nulový stimul nemal priradenú žiadnu polohu, bolo to iba prehrávané ticho rovnakej dĺžky ako adaptor.

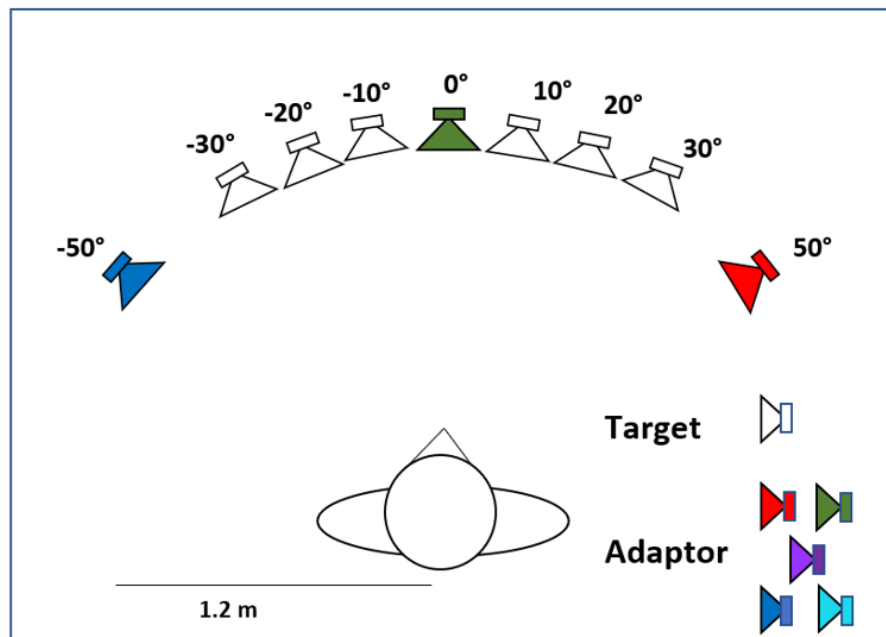


Obr. 10. Názorne zobrazenie jednotlivých stimulov

Tieto typy stimulov boli rovnaké pre virtuálne reverberantné aj pre virtuálne anechoické prostredie. Rozdiel bol v tom, že v reverberantnom prostredí stimuly obsahovali zvuky aj ozvenu a v anechoickom prostredí boli zvuky bez ozveny.

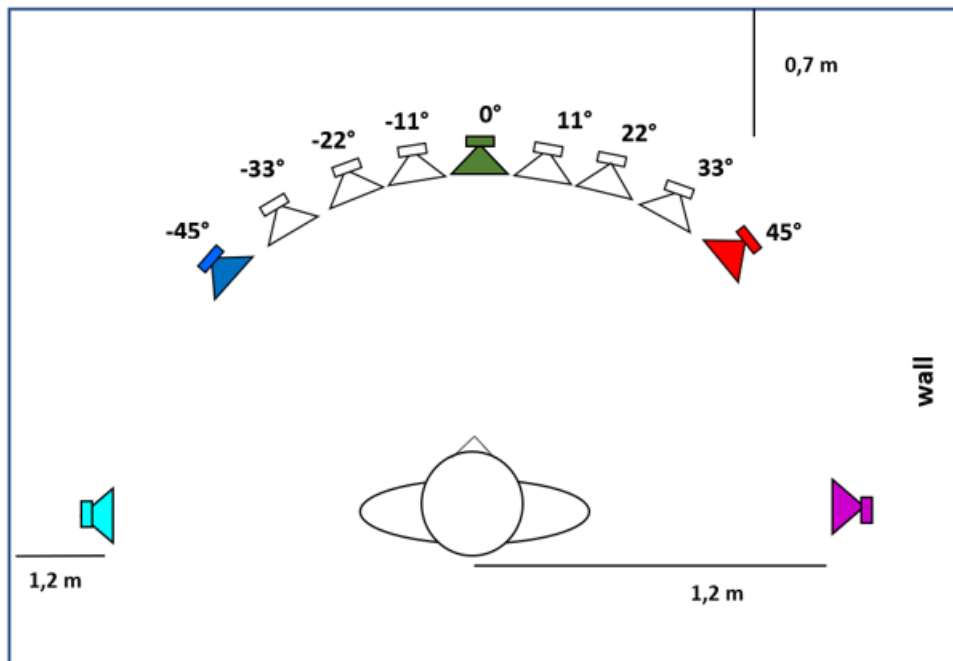
Obr. 11 zobrazuje rozmiestnenie experimentu vo virtuálnom prostredí. Targety, ktoré mali poslucháči lokalizovať, boli prehrávané z reproduktorov zobrazených bielou farbou. Farebné reproduktory znázorňujú polohu reproduktorov, z ktorých boli prezentované adaptory. Presne oproti poslucháčovi sa nachádzal adaptor na 0° a ďalšie dva adaptory sa nachádzali na 50° na ľavej a pravej strane. Targety sa nachádzali na 10°, 20°, 30° na ľavej a pravej strane. Negatívne hodnoty stupňov reprezentujú targety a adaptory na ľavej strane a kladné hodnoty reprezentujú targety a adaptory na pravej strane. Toto je však iba názorné rozmiestnenie experimentu, pretože stimuly boli prehrávané cez slúchadlá. Zvuky boli

upravené, aby participanti počuli stimuly prichádzať z polôh zobrazených na obrázku. V akom poradí sa tieto stimuly prehrávali záviselo od aktuálneho typu kola.



Obr. 11. Rozmiestnenie pozícií stimulov vo virtuálnom prostredí

V reálnom prostredí sa rozmiestnenie líšilo. Prehrávané boli aj adaptory na -90° a 90° a adaptory na strane boli umiestnené na pozíciách -45° a 45° . Pozície targetov boli -33.75° , -22.5° , -11.25° , 11.25° , 22.5° a 33.75° . Obr. 12 názorne zobrazuje rozmiestnenie adaptorov a targetov. V reálnom prostredí boli stimuly prehrávané cez reproduktory. Aj keď sa pozície targetov a adaptorov v reálnom a virtuálnom prostredí mierne líšili, pri výsledkoch a analýzach ich považujeme za rovnaké.



Obr. 12. Rozmiestnenie pozícií stimulov v reálnom prostredí

Experiment sa skladal z týchto typov kôl:

- KONTEXTUÁLNE KOLO
- BASELINE

Kontextuálne kolo pozostávalo z target stimulov a adaptor stimulov. Target stimuly boli prehrávané zo všetkých polôh a v pseudonáhodnom poradí. Adaptor stimuly sa prehrávali v rámci kola iba z jednej pozície.

Baseline kolo pozostávalo z target stimulov a nulových stimulov. Rovnako ako v kontextuálnom kole, target stimuly boli prehrávané zo všetkých polôh a v pseudonáhodnom poradí. Keďže mal nulový stimul rovnakú dĺžku ako adaptor stimul, dĺžka baseline a kontextuálneho kola bola rovnaká.

Experimentálne kolá pozostávali z viacerých **trialov**. Trial tvorilo prehratie stimulu a odpovedanie. Rozlišovali sme 2 trialy: target trial a adaptor trial. Target trial bola prezentácia target stimulu z náhodnej pozície a jeho lokalizácia pomocou klávesnice a adaptor trial bola prezentácia adaptor stimulu z fixnej pozície a potvrdenie stlačením

„Enter“ alebo v baseline kole to bola prezentácia nulového stimulu a potvrdenie stlačením „Enter“.

V oboch typoch kôl bolo zabezpečené, aby sa targety prehrávali náhodne, avšak aby počet prehratí jedného target stimulu bol rovnaký pre všetky polohy target stimulov. Skupina trialov (6 target trialov pre každú pozíciu targetu a im zodpovedajúcich adaptorových trialov) tvorí jeden **subrun**. V priebehu jedného kola bol každý target prehraný 19krát, takže v rámci kola bolo 19 subrunov. Jednotlivé kolá boli rozdelené pomocou subrunov na 3 časti:

- PREDADAPTAČNÁ ČASŤ
- ADAPTAČNÁ ČASŤ
- POSTADAPTAČNÁ ČASŤ

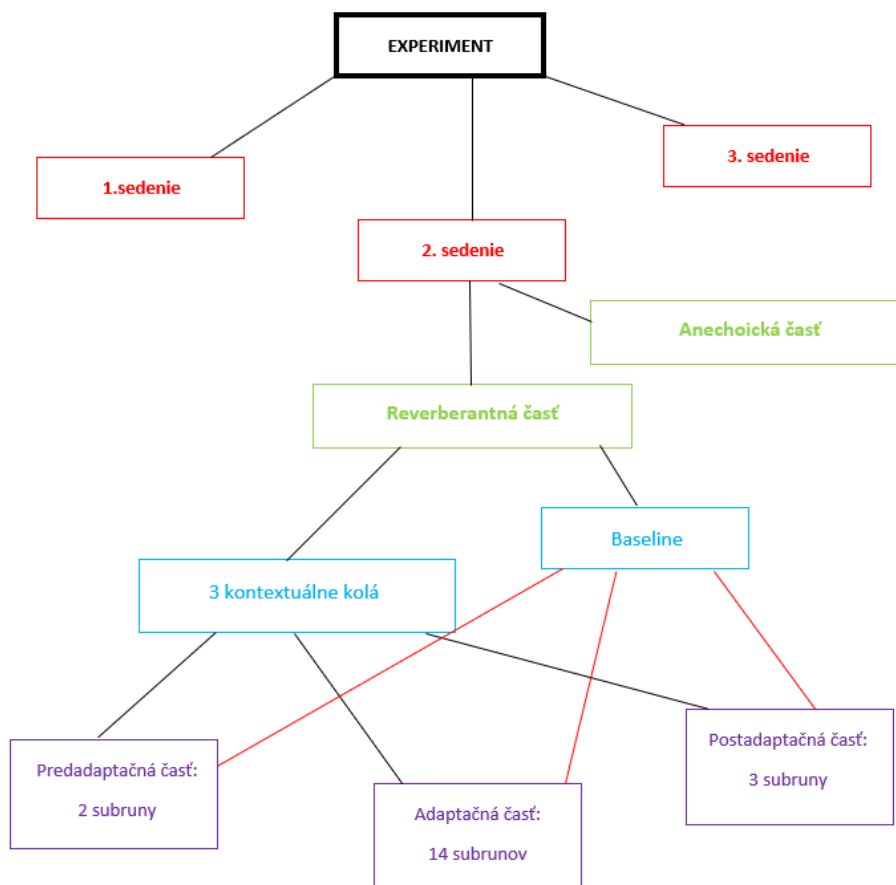
V predadaptačnej a postadaptačnej časti kola boli prehrávané iba target stimuly, takže subrun bol tvorený 6 target trialmi. To platilo pre kontextuálne kolo aj baseline kolo. Rozdiel týchto kôl bol práve v adaptačnej časti. V adaptačnej časti *kontextuálneho kola* boli prehrávané target stimuly aj adaptor stimuly, ktoré sa striedali náhodne a počet prehrávaných targetov bol rovnaký ako počet prehrávaných adaptor stimulov (čiže subrun mal 12 trialov) v pomere 50:50. Adaptačná časť *baseline kola* bola rovnaká ako adaptačná časť v kontextuálnom kole s tým, že adaptor bol nahradený nulovým stimulom.

V predadaptačnej časti kola boli prehrané **2 subruny** (teda 12 prehraných target stimulov). V adaptačnej časti bolo prehraných **14 subrunov**, teda 84 target stimulov. Rovnaký počet prehraní bol aj pre adaptor stimul v kontextuálnom kole alebo nulový stimul v baseline kole. V postadaptačnej časti boli prehrané **3 subruny**, teda 18 target stimulov. Spoločne to bolo **198 prehraných stimulov**. 12 stimulov v predadaptačnej časti, 84 target stimulov a 84 adaptor alebo nulových stimulov v adaptačnej časti a 18 target stimulov v postadaptačnej časti.

Keďže v kontextuálnom kole bol adaptor prehrávaný iba z jednej pozície a pozície pre adaptor boli tri, v rámci jedného virtuálneho prostredia boli 3 rôzne kontextuálne kolá. Baseline kolo bolo iba jedno pre dané virtuálne prostredie. Spolu boli 4 kolá pre virtuálne reverberantné prostredie a 4 pre virtuálne anechoické prostredie. Kolá pre jednotlivé prostredia sa striedali. Najprv bolo prehrávané kolo v reverberantnom virtuálnom

prostredí a za ním nasledovalo kolo vo virtuálnom anechoickom poradí, alebo opačne. Týchto 8 kôl absolvovali poslucháči v rámci jedného **sedenia**, absolvovaného v jeden deň. Celý experiment mal 3 sedenia, každé sa uskutočnilo v iný deň.

Na Obr. 13 je schematicky znázornená štruktúra experimentu.



Obr. 13. Štruktúra experimentu

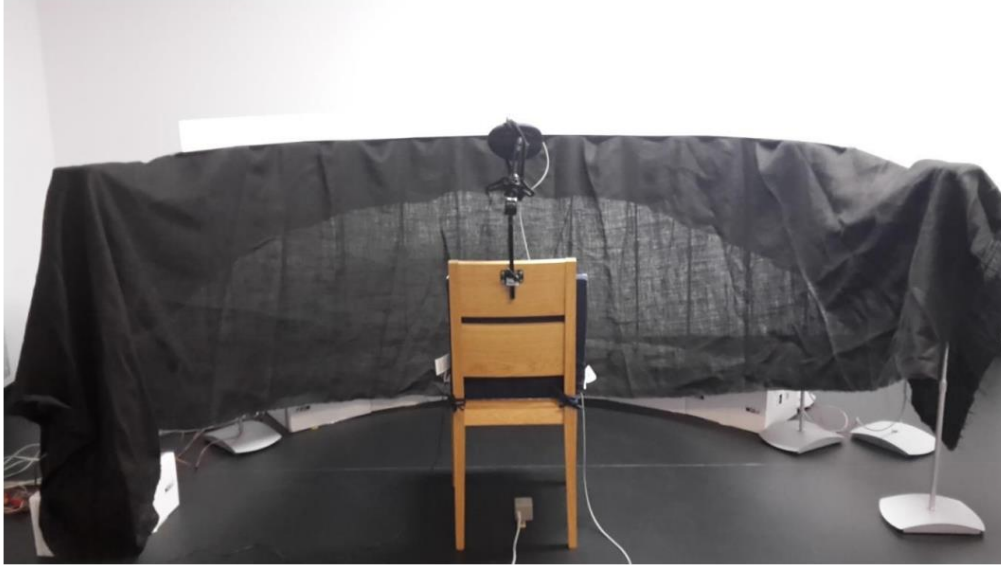
Experiment v reálnom prostredí prebiehal podobne, s tým rozdielom, že počet kontextuálnych kôl bolo 5, pre každú pozíciu adaptora. Keďže bolo prezentované iba jedno prostredie, počas sedenia participanti absolvovali spolu 6 kôl (baseline a 5 kontextuálnych kôl). Experiment mal 3 sedenia, každé v iný deň.

V rámci experimentu mali poslucháči možnosť využiť 10 – 15 minútovú prestávku medzi kolami.

Adaptor trial trval priemerne 2.9 sekundy a target trial 4.3 sekundy. Jedno kolo trvalo priemerne 12 minút. Keďže počas jedného sedenia bolo 8 kôl, sedenie trvalo priemerne 2.5 hodiny. Sedenie počas experimentu v reálnom prostredí trvalo priemerne 2 hodiny.

3.2 Forma odpovedania

Participantí sedeli na stoličke v miestnosti, na ušiach mali slúchadlá a hlavu si mohli oprieť o podporný držiak pripevnený na stoličke. Reprodukory boli prekryté tmavou akusticky transparentnou látkou a na nej bol prichytený biely pás. Rozloženie stoličky a reproduktorov je zachytené na obrázku (Obr. 14)



Obr. 14. Rozmiestnenie v experimentálnej miestnosti (Piková, 2018)

Počas experimentu bola v miestnosti tma, poslucháči mali v rukách numerickú klávesnicu a projektor premietal na biely pás pred nimi kombinácie čísel a znakov ako je zobrazené na obrázku (Obr. 15).



Obr. 15. Príklad kombinácií premietaných na páse (Piková, 2018)

Kombinácie čísel a znakov „/“ a „plus“ sa menili pri každom target stimule. Dvojica znakov, ktorú zadali cez numerickú klávesnicu sa zafarbila na červeno. Ak boli poslucháči so svojou voľbou spokojní, potvrdili ju stlačením klávesy „Enter“. Ak bol prehrávaný adaptor stimul alebo nulový stimul, čísla sa zmenili na písmená zafarbené modrou farbou, aby upozornili poslucháča, že tieto stimuly nemá lokalizovať, ale iba potvrdiť ich vypočutie stlačením klávesy „Enter“.

Počas experimentu bolo zabezpečené, aby boli participanti otočení presne na stred a aby neotáčali hlavu na strany pri prehrávaní stimulov. Na kontrolu natočenia hlavy participanta bol použitý tracker polohy Polhemus Liberty. Toto zariadenie bolo prichytené čelenkou na hlave poslucháča a upozornilo ho, ak nemal správne natočenú hlavu.



Obr. 16. Fotografia použitia tracker Polhemus LIBERTY (Piková, 2018)

3.3 Tréning

Participanti pred experimentom absolvovali krátky tréning, aby sa naučili odpovedať aj bez pozerania sa na klávesnicu. Táto metóda odpovedania sa využíva, pretože je najpresnejšia (Kopčo et al., 2015) a participanti s rovnakou námahou odpovedajú pri každej polohe stimulu. Ak bolo použité ukazovadlo alebo natočenie hlavy, jednoduchšie bolo odpovedať pri stimuloch, ktoré boli prezentované blízko pri strede ako pri stimuloch, ktoré boli od stredu ďaleko.

Tréning pozostával zo 4 častí:

- Tréning odpovedania pomocou numerickej klávesnice
- Tréning odpovedania a oboznámenia sa s rôznymi typmi stimulov v reverberantnom virtuálnom prostredí
- Tréning odpovedania a oboznámenia sa s rôznymi typmi stimulov v anechoickom virtuálnom prostredí
- Meranie presnosti lokalizácie v reverberantnom virtuálnom prostredí

V prvej časti mali subjekty zadať určenú kombináciu dvoch znakov. Na stene bolo premietané rozloženie klávesov na klávesnici, aby sa poslucháči vedeli ľahšie orientovať a nacvičiť si to. Ak zadali zľú kombináciu, boli upozornení, aby zadali kombináciu opätovne.

V druhej časti sa prehrávali rôzne typy stimulov v reverberantnom virtuálnom prostredí a poslucháči mali odpovedať podľa toho, či to bol target stimul, adaptor stimul alebo nulový stimul.

Tretia časť bola podobná druhej, rozdiel bol ten, že tu sa prehrávali stimuly v anechoickom virtuálnom prostredí.

Vo štvrtnej časti boli prehrávané iba target stimuly v reverberantnom virtuálnom prostredí a poslucháči ich mali lokalizovať. Odpovede sa ukladali a následne sa analyzovala presnosť lokalizácie daného poslucháča.

Tréning trval približne 30 až 45 minút. Po tréningu nasledovalo prvé sedenie experimentu.

3.4 Technické parametre experimentu

Pre spustenie experimentu bola použitá platforma MATLAB. Počas experimentu bol používaný notebook značky ASUS. Zvuk sa prehrával cez zvukovú kartu RME Fireface a cez slúchadlá značky Sennheiser HD 800. Na sledovanie natočenia hlavy participanta bol použitý tracker Polhemus LIBERTY a na premietanie kombinácii na pás nad reproduktormi bol použitý projektor MITSUBISHI.

4 Metódy

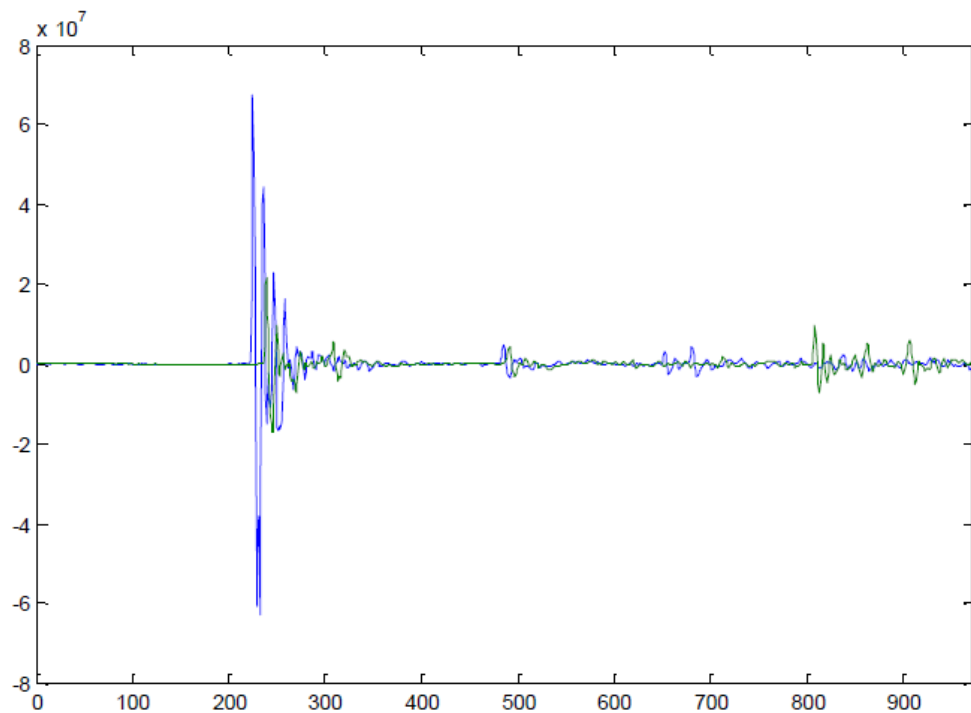
V tejto kapitole je opísaný postup a spôsob upravovania stimulov pre virtuálne prostredie, analýzy, úprava dát a metódy, pomocou ktorých boli vyhodnocované výsledky.

4.1 Úprava stimulov pre virtuálne prostredia

Stimuly pre virtuálne reverberantné prostredie sme získali konvolúciou BRIR funkcie a zvuku, ktorý sme chceli prehrávať. Tak vznikol stimul vo virtuálnom prostredí, ktorý simuloval reálne reverberantné prostredie aj s ozvenami od stien a objektov v prostredí.

Stimuly pre virtuálne anechoické prostredie sme získali tak, že sme z BRIR funkcie odstrihli časť, ktorá poskytovala informácie o ozvenách. Takto sme dostali iba zvuk, ktorý prišiel ku poslucháčovi priamo. Následne sme použili konvolúciu upravenej BRIR funkcie a zvuku, ktorý sme chceli prehrávať. Stimuly v anechoickom prostredí neobsahujú žiadnu ozvenu.

Na obrázku (Obr. 17) je zobrazený príklad BRIR funkcie.



Obr. 17. Príklad BRIR funkcie

Prvá časť BRIR funkcie obsahuje priamu časť, zvuk, ktorý ku participantovi prichádza priamo od zdroja. Druhá časť obsahuje ozveny zvuku od stien, podlahy a objektov v miestnosti. V tomto prípade je hranica medzi týmito časťami približne 470ms. Po tomto čase už ku participantovi prichádzajú ozveny. Aby sme získali anechoickú HRTF, odstrihli sme časť, ktorá nasleduje po tomto čase. Na konvolúciu bola použitá táto HRTF funkcia.

4.2 Analýza experimentálnych dát

Po nazbieraní experimentálnych dát nasledovala ich analýza a vymazanie outlierov.

Outliery sú dáta, ktoré sú pod alebo nad hranicou priemerných hodnôt. Ak boli určité dáta označené za outlier, v ďalších analýzách sa nepoužívali. Hranicu, ktorá určuje outliery, možno stanoviť rôznymi spôsobmi a pri tejto analýze bolo použité nasledovné kritérium. Ako prvý bol vypočítaný medián pre určené dáta. Nazveme ho m . Následne bol od jednotlivých dát odčítaný tento medián m . Použili sme absolútne hodnoty týchto rozdielov a vypočítali z nich opäť medián. Tento medián nazveme mI . Násobok mediánu mI sa použil ako hranica pre outliery. Pri analýzách sme používali štvornásobok mediánu mI . Teda hranica pre outliery bola $4 \times mI$. Ak absolútna hodnota rozdielu jednotlivých dát a mediánu m bola väčšia ako daná hranica, označili sme dáta za outliery.

Dáta pre jedného participanta vo virtuálnom prostredí sme do analýz nezahrnuli pre veľký počet outlierov, ktoré vznikli pravdepodobne pre technické dôvody.

Počet odstránených outlierov pre jednotlivých participantov (9 participantov) je znázornený v tabuľke (Tab. 1). Najprv bol vypočítaný počet outlierov pre jednotlivé kolá a potom ich súčet. V prvej tabuľke sú hodnoty pre reálne reverberantné prostredie a celkový počet bol 733 outlierov, čo je mierne pod 5% celkových dát. Druhá tabuľka ukazuje outliery pre virtuálne reverberantné prostredie a tretia pre virtuálne anechoické. Vo virtuálnom prostredí bol celkový počet outlierov 543 v reverberantnom a 566 v anechoickom, čo je tiež pod 5%. Pre prvý subjekt sme odstránili aj dáta z druhého sedenia, no celkový počet odstránených dát bol ešte stále v poriadku.

Participant	-90° A	-45° A	0° A	45° A	90° A	Baseline	Spolu
1	11	8	9	13	20	7	68
2	8	15	23	16	20	10	92
3	14	10	13	8	12	7	64
4	11	8	20	9	19	13	80
5	26	29	28	22	24	24	153
6	16	18	32	16	23	19	124
7	9	13	11	19	12	12	76
8	11	18	18	11	9	9	76

Tab. 1 Počet outliero v pre jednotlivých participantov v reálnom prostredí

Participant	-50° A	0° A	50° A	Baseline	Spolu
1	20	25	18	18	81
2	13	22	20	11	66
3	12	9	8	8	37
4	12	5	17	10	44
5	12	13	23	22	70
6	18	15	26	7	66
7	17	12	15	11	55
8	23	12	20	9	64
9	18	22	8	12	60

Tab. 2 Počet outliero v pre jednotlivých participantov vo virtuálnom reverberantnom prostredí

Participant	-50° A	0° A	50° A	Baseline	Spolu
1	21	26	19	19	85
2	14	23	21	12	70
3	9	10	9	9	37
4	13	6	18	11	48
5	13	14	24	17	68
6	19	16	27	8	70
7	18	13	16	12	59
8	24	13	21	10	68
9	19	23	6	13	61

Tab. 3 Počet outlierov pre jednotlivých participantov vo virtuálnom anechoickom prostredí

Počet outlierov pre jednotlivé prostredia bol približne rovnaký, taktiež žiadne kolo nemalo príliš veľa outlierov a ani žiaden subjekt sa nelíšil počtom outlierov od priemerných hodnôt.

V ďalších analýzach sme používali aj prevrátené dáta. Pri prevrátení sme využili symetričnosť výsledkov pre pravé a ľavé targety a zrkadlovo sme ich prevrátili a otočili podľa 0°. Výsledky pre laterálny adaptor na -50° pre target na 30° sme spriemerovali s výsledkami pre laterálny adaptor na 50° pre target na -30°. Dáta pre frontálny adaptor sme spojili nasledovne. Spriemerovali sme dáta pre 30° target s dátami pre target na -30°. Takto sme pokračovali pre všetky pozície targetov. Výsledky pre frontálny adaptor boli potom symetrické podľa 0°.

4.3 Metódy použité pri vyhodnocovaní kontextuálnej plasticity

Kontextuálnu plasticitu sme vyhodnocovali v kontexte modelov Carlile et al. (2001) a Lingner et al. (2018). Na vyhodnotenie sme používali:

- Štandardnú odchýlku
- Pearsonov korelačný koeficient

-
- Mieru informačného prenosu

4.3.1 Štandardná odchýlka

Pri vyhodnocovaní lokalizácie zvukov je vhodné použiť štandardnú odchýlku, pretože hovorí o presnosti obrazu v mozgu. Ak je pre určitú pozíciu štandardná odchýlka malá, znamená to, že pozícia je v mozgu reprezentovaná presne a nevzniká pri lokalizácii vysoká variabilita. Nevýhodou je, že štandardná odchýlka môže byť pre určitú pozíciu malá, no pritom participanti pozíciu lokalizujú s určitým posunom od reálnej pozície, a to sa na hodnote štandardnej odchýlky neprejaví.

Štandardná odchýlka nezohľadňuje, či je stred odchýlky rovnaký ako prezentovaná pozícia.

Výsledky pre štandardné odchýlky sme vyhodnotili nasledovne. Ako prvé sme po odstránení outlierov vypočítali štandardnú odchýlku z 10 posledných subrunov adaptačnej časti pre každé kolo, pre každého participanta, pre každú pozíciu targetu a pre každé sedenie experimentu. Následne boli štandardné odchýlky spriemerované cez všetky tri sedenia. Potom sa dáta symetricky preklopili podľa 0° . V kapitole 5 sú zobrazené štandardné odchýlky po tejto úprave.

4.3.2 Pearsonov korelačný koeficient

Pri porovnávaní kontextuálnej plasticity s adaptačnými modelmi sme používali Pearsonov korelačný koeficient, pretože na rozdiel od štandardnej odchýlky, korelácia zohľadňuje aj stred odchýlok, aj rozptyl odpovedí. Nevýhodou je predpoklad lineárneho vzťahu. Ak odpovede nespĺňajú linearitu, korelácia sa znižuje. Taktiež nie je možné vyrátať koreláciu iba pre jeden bod, v našom prípade pre jednu pozíciu targetu. Preto sme dáta pred vyhodnotením korelácie upravili. Ako prvé sme odstránili outliery a následne sme rozdelili dáta pre pravé a pre ľavé targety. Opäť sme používali dáta z 10 posledných subrunov adaptačnej časti. Pre každého participanta, každé kolo a každé sedenie sme vypočítali korelácie medzi skutočnou pozíciou prehrávaného pravého targetu a medzi odpoveďou participanta v danej podmienke. Rovnako sme vypočítali aj korelácie pre ľavé pozície targetov. Následne sme symetricky spriemerovali dáta pre pravé a ľavé

targety. Spojili sme dáta pre pravé targety v kole s adaptorom na -90° alebo $-45^\circ/-50^\circ$ s dátami pre ľavé targety v kontextuálnom kole s adaptorom na 90° alebo $45^\circ/50^\circ$. Dáta pre frontálny adaptor sme získali klasickým spriemerovaním dát pre pravé a ľavé targety a rovnako sme spojili aj dáta pre baseline pre pravé a ľavé targety. Dáta pre laterálne adaptory sme spájali zrkadlovo, pretože pre pravé targety sú kontralaterálne adaptory -90° , -45° a -50° a ipsilaterálne 90° , 45° , 50° a pre ľavé targety je to naopak.

4.3.3 Informačný prenos

Náhodná premenná f nad diskretnou abecedou má pravdepodobnostnú funkciu označenú p_f . Môžeme teda napísať aj (Gray, 1990).

$$H(f) = - \sum_{a \in A} p_f(a) \ln p_f(a) \quad (1)$$

Pomocou entropie vieme vypočítať aj vzájomnú informáciu dvoch premenných. Vzájomná informácia meria množstvo informácie o jednej náhodnej premennej, ktorú získame pozorovaním druhej náhodnej premennej (Shannon, 1948).

Počítame ju ako

$$R = H(x) + H(y) - H(x, y) \quad (2)$$

kde $H(x)$ je entropia jednej premennej, $H(y)$ je entropia druhej premennej a $H(x, y)$ je združená entropia premenných x a y .

Mieru **informačného prenosu** medzi premennou x a y získame normalizovaním vzájomnej informácie premenných x a y entropiou $H(x)$ (Miller a Nicely, 1954).

Mieru informačného prenosu sme používali na vyhodnotenie kontextuálnej plasticity, pretože je robustná na porušenie linearitu a zohľadňuje stred odchýlok. Avšak aj pri tejto metóde sa môžu vyskytnúť určité anomálie, kedy bude výsledná hodnota informačného prenosu nízka, no z pohľadu predstavených modelov, bude lokalizácia dobrá.

Podobne ako pri korelácii, aj pri informačnom prenose sme pracovali iba s adaptačnou časťou dát, konkrétne s poslednými 10 subrunmi adaptačnej časti. Dáta sme rozdelili pre pravé a ľavé targety a vytvorila sa konfúzna matica (angl. confusion matrix). Počet

riadkov bol 3, pre 3 pravé targety a počet stĺpcov bol 119, pre celý rozsah možných odpovedí v jednostupňovom rozlíšení. Participanti mohli lokalizovať targety po jednom stupni od -59° po 59° v reálnom reverberantnom aj v oboch virtuálnych prostrediach. Pre takúto maticu bola vypočítaná entropia riadkov hR , entropia stĺpcov hC a entropia celej matice hM . Následne bola vypočítaná vzájomná informácia (angl. mutual information) podľa vzorca $mI = hR + hC - hM$. Miera informačného prenosu sa vypočítala ako podiel mI a hR .

Mieru informačného prenosu pre ľavé targety a pre pravé targety sme zrkadlovo spriemerovali. Kontralaterálne adaptory na -90° a $-45^\circ/-50^\circ$ pre pravé targety sme spriemerovali s dátami pre kontralaterálne adaptory na 90° a $45^\circ/50^\circ$ pre ľavé targety.

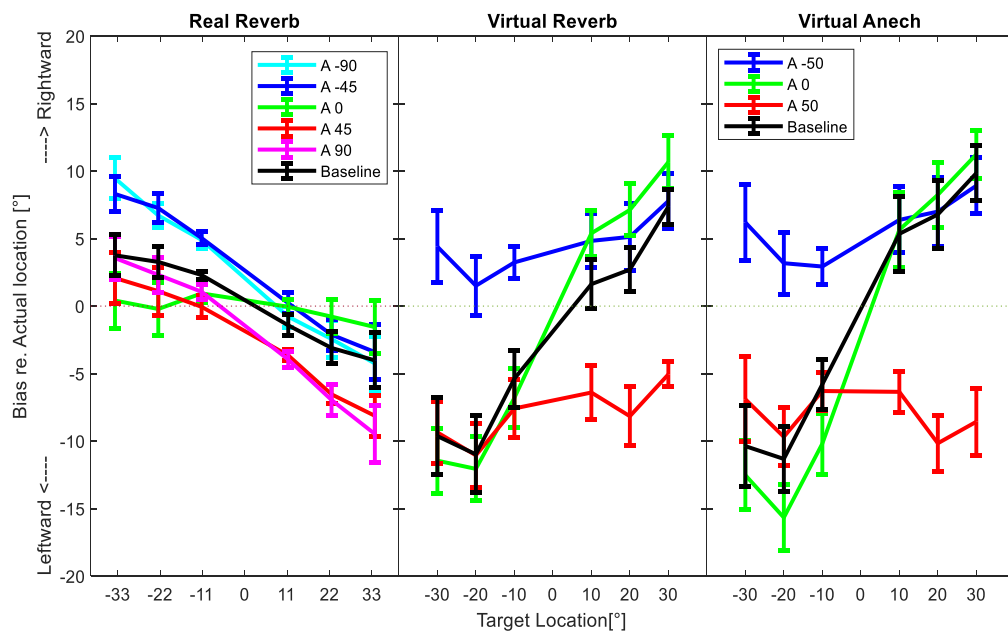
5 Výsledky experimentu

Ako prvé sú predstavené výsledky pre priestorovú adaptáciu. Výsledky ukázali ako prítomnosť adaptoru ovplyvňovala lokalizáciu targetov. V druhej časti je popísaný vývin kontextuálnej plasticity a jej vplyv na lokalizáciu targetov v priebehu celého kola. Taktiež sú zobrazené aj výsledky pre vplyv predchádzajúcich stimulov na target stimul. Aký vplyv na lokalizáciu targetov má predchádzajúci stimul (teda stimul prezentovaný v predchádzajúcom triali), ktorý je adaptor alebo target. Posledná časť je zameraná na porovnanie kontextuálnej plasticity v kontexte adaptačných modelov Carlile et al. (2001) a Lingner et al. (2018) pomocou variancie odchýlok v lokalizácii, korelácie odpovedí a reálnej pozície prehrávaného targetu a pomocou miery informačného prenosu.

5.1 Výsledky priestorovej adaptácie

Naša hypotéza je, že kontextuálna plasticita bude pozorovaná aj pri pasívnom počúvaní kontextu a bude pozorovaná aj vo virtuálnom prostredí. Hypotéza sa potvrdí, ak budú targety pri prehrávaní adaptoru z fixnej pozície lokalizované s odchýlkami v smere od adaptoru.

Na nasledujúcom grafe (Obr. 18) sú zobrazené výsledky pre lokalizáciu prehrávaných target stimulov. Odpovede participantov sú zobrazené na vertikálnej osi ako rozdiel medzi pozíciou targetu a lokalizovanou pozíciou. Na horizontálnej osi sú zobrazené reálne pozície targetov. Jednotlivé čiary v grafe zobrazujú vypočítané odchýlky spriemerované cez participantov pre jednotlivé kolá s prehrávaným adaptorom na určitej pozícii. Červená čiara zobrazuje odchýlky participantov, ak bol v danom kole prehrávaný adaptor z pozície 45° v reálnom prostredí a 50° vo virtuálnom. Čierna čiara zobrazuje odpovede v baseline kole. Odchýlky s kladnou hodnotou reprezentujú odpoveď participantov s posunom smerom doprava od reálnej pozície prehrávaného targetu a záporné hodnoty znázorňujú posun v lokalizácii smerom doľava. Ak bol prehrávaný target na pozícii -33.75° , participant ho lokalizovali s posunom približne 10° doprava, teda na -23° . Priamo pred participantom je 0° , v smere doprava sú kladné hodnoty stupňov a v smere doľava sú hodnoty stupňov záporne.



Obr. 18. Odchýlky pri lokalizácii targetov

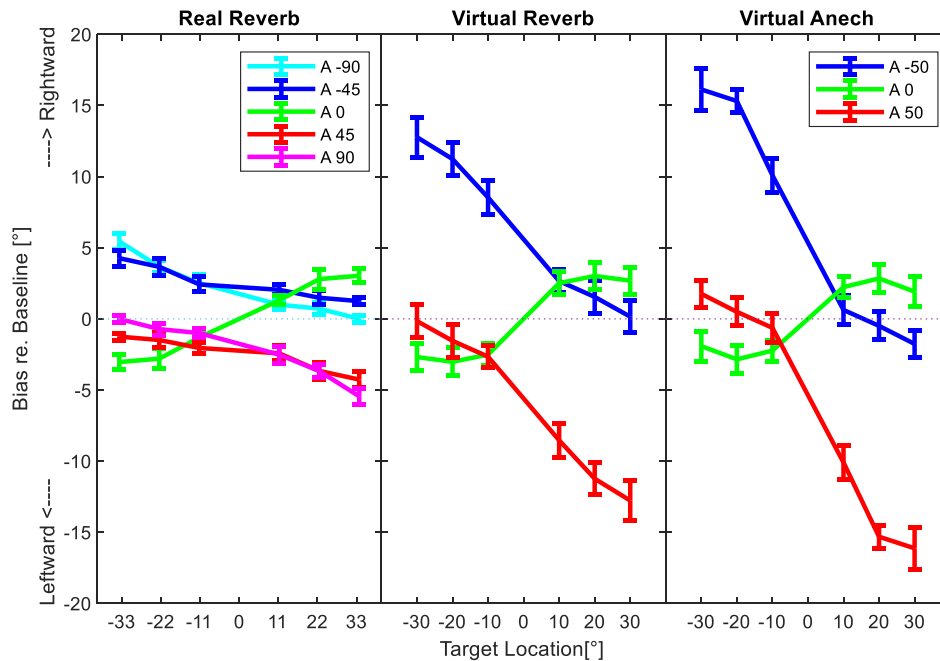
Celková lokalizácia participantov v reálnom a virtuálnom prostredí je porovnávaná na grafe (Obr. 18). Výsledky pre baseline kolo v reálnom prostredí ukazujú, že participantí lokalizovali ľavé targety s posunom v smere doprava a pravé targety lokalizovali s posunom v smere doľava. Pozíciu prehrávaného targetu vnímali bližšie k stredu ako v skutočnosti bola. Participantí mali v reálnom prostredí tendenciu podhodnocovať pozíciu targetu. Naopak, pre baseline kolo vo virtuálnom reverberantnom a virtuálnom anechoickom prostredí výsledky ukazujú, že participantí ľavé targety lokalizovali s posunom v smere doľava a pravé targety lokalizovali s posunom v smere doprava. Pozíciu prehrávaného targetu participantí vnímali s posunom na stranu od reálnej pozície targetu. Participantí vo virtuálnom prostredí nadhodnocovali pozície targetov. Výsledky boli vyhodnotené aj zo štatistického hľadiska. Na vyhodnotenie bola použitá ANOVA s opakovanými meraniami. Faktormi v reálnom prostredí boli pozície adaptoru (adaptor na -90° , -45° , 0° , 45° , 90° a baseline) a pozície targetu (-33.75° , -22.5° , -11.25° , 11.25° , 22.5° , 33.75°). Výsledok pre faktor adaptor vyšiel signifikantný: $F(5, 35) = 36.16$, $p = 0.000$. Uvádzané budú aj p hodnoty po Box-Geisser-Greenhouse korekcii a označíme ich $BGG-p$. Pre daný faktor bola hodnota $BGG-p = 0.01$. Signifikantný výsledok bol aj pre faktor target: $F(5, 35) = 8.17$, $p = 0.000$, $BGG-p = 0.05$. Signifikantná vyšla aj interakcia medzi adaptor pozíciou a target pozíciou: $F(24, 175) = 21.27$, $p = 0.000$, $BGG-p = 0.01$.

Vo virtuálnom prostredí boli výsledky pre faktory adaptor (-50°, 0°, 50°, baseline) a target (-30°, -20°, -10°, 10°, 20°, 30°) podobné. Výsledky pre adaptor: $F(3, 24) = 149.31, p = 0.000, BGG-p = 0.01$, výsledky pre target pozície: $F(5, 40) = 7.42, p = 0.000, BGG-p = 0.05$ a výsledky pre interakciu adaptoru a targetu: $F(15, 120) = 52.24, p = 0.000, BGG-p = 0.01$. Signifikantná bola aj interakcia medzi targetom, adaptorom a prostredím (virtuálne reverberantné a virtuálne anechoické): $F(15, 120) = 2.39, p = 0.004, BGG-p = 0.1$. Efekt pre faktor prostredie nevyšiel signifikantný: $F(1, 8) = 0.31, p = 0.593$. Taktiež ostatné interakcie neboli signifikantné.

Výsledky pre ANOVU potvrdzujú, že hodnota odchýlok v lokalizácii závisela od toho, či bol target v blízkosti adaptoru alebo nie a taktiež závisela od typu prehrávaného adaptoru.

Nasledujúca analýza je zameraná na efekt adaptorov. Obr. 19 zobrazuje prevrátené dáta pre jednotlivé pozície adaptorov po odčítaní dát pre baseline kolo.

Adaptor na pozíciách 90° a 45° v reálnom prostredí spôsobil odchýlku v smere doľava, prevažne pre targety najbližšie pri prehrávanom adaptore. Participanti lokalizovali target na 33.75° s odchýlkou -5°, teda v smere doľava od prehrávaného adaptoru. Čím bola pozícia targetu ďalej od adaptoru, tým bola odchýlka menšia. Pre target na 11.25° bola odchýlka približne -2° a pre target, ktorý bol najďalej, teda na -33.75°, bola odchýlka 0°. Lokalizáciu tohto targetu prítomnosť adaptoru na pravej strane vôbec neovplyvnila. Výsledky pre virtuálne prostredie sú podobné. Ak bol prehrávaný adaptor na 50°, najväčšiu odchýlku spôsobil pri lokalizácii najbližšieho targetu. Odchýlka pre target na 30° vo virtuálnom reverberantnom prostredí bola približne -13° a vo virtuálnom anechoickom bola odchýlka približne -16°.



Obr. 19. Odchýlky pri lokalizácii targetov vzhľadom na baseline

Hodnota odchylok sa znižovala pre targety s narastajúcou vzdialenosťou od prehrávaného adaptora. Participanti lokalizovali target na 10° s odchyľkou -8° vo virtuálnom reverberantnom prostredí a s odchyľkou -10° vo virtuálnom anechoickom. Pre target na -30° bola odchyľka v lokalizácii 0° alebo 2° . Podobné výsledky sú aj pre adaptory na ľavej strane. Odchyľka bola najväčšia pre najbližšie targety. Výsledky pre frontálny adaptor vo virtuálnom prostredí nemajú podobný trend ako laterálne adaptory, pretože odchyľky boli približne rovnaké pre všetky pozície targetov a v reálnom prostredí sa odchyľka zväčšovala s narastajúcou vzdialenosťou od adaptora.

Pre reálne prostredie bola vyhodnotená ANOVA pre faktor adaptor (pozície 45° , 90°) a faktor target (všetkých 6 pozícií). Signifikantná bola pozícia targetu: $F(5, 35) = 20.44$, $p = 0.000$, $BGG-p = 0.01$ a interakcia adaptora a targetu: $F(5, 35) = 4.74$, $p = 0.002$, $BGG-p = 0.05$. Tento výsledok znamená, že veľkosť odchyľky závisela od vzdialenosti od prehrávaného adaptora, teda odchyľky boli vyššie v blízkosti adaptora. Signifikantná interakcia hovorí, že odchyľky pre najbližší target boli väčšie, ak bol prehrávaný adaptor na 90° , ale menšie pre vzdialené targety, ako keď bol prehrávaný adaptor na 45° .

ANOVA bola tiež použitá pre frontálny adaptor a pozície targetu (11.25° , 22.5° , 33.75°). Výsledky pre target vyšli signifikantne: $F(2, 14) = 8.10$, $p = 0.005$, $BGG-p = 0.05$. Odchyľky boli menšie pre targety pri adaptore ako pre vzdialené targety.

Vo virtuálnom prostredí bola vyhodnotená ANOVA pre laterálny adaptor na -50° a pre pozíciu targetu (všetkých 6 pozícií) a prostredie (virtuálne reverberantné a virtuálne anechoické). Výsledky pre faktor target sú nasledovné: $F(5, 40) = 63.66, p = 0.000, BGG-p = 0.01$. Signifikantná bola aj interakcia pre prostredie a target: $F(5, 40) = 3.51, p = 0.01, BGG-p = 0.1$. Veľkosť odchýlky závisela od pozície targetu. Najväčšie odchýlky boli pri prehrávanom adaptore a so vzdialenosťou od adaptora klesali. Hodnota odchýlky taktiež závisela od prostredia. Vo virtuálnom anechoickom prostredí boli odchýlky väčšie pre targety blízko adaptora, ale menšie pre targety vzdialené od adaptora, ako vo virtuálnom reverberantnom prostredí.

ANOVA bola použitá aj pre frontálny adaptor pre faktor target ($10^\circ/11.25^\circ, 20^\circ/22.5^\circ, 30^\circ/33.75^\circ$) a faktor prostredie (spriemerované virtuálne a reálne). Pozícia targetu vyšla signifikantne: $F(2, 30) = 4.83, p = 0.015, BGG-p = 0.05$ a signifikantná bola aj interakcia target a prostredie: $F(2, 30) = 3.44, p = 0.045, BGG-p = 0.05$. Odchýlky mali iné hodnoty pre targety blízko adaptora v reálnom a virtuálnom prostredí. V reálnom prostredí bola odchýlka pre najbližší target najmenšia.

Taktiež boli v reálnom prostredí porovnávané výsledky pre laterálny adaptor -45° a frontálny z hľadiska blízkosti ku adaptoru. Faktorom bol adaptor (frontálny a laterálny -45°) a target pozícia ($-33.75^\circ, -22.5^\circ, -11.25^\circ$) a porovnávané boli najbližšie targety pre obe adaptory, teda -33.75° pre laterálny a -11.25° pre frontálny. Target na -22.5° je pre obe adaptory druhý najbližší a tretí najbližší je pre laterálny -11.25° a pre frontálny -33.75° . Signifikantný bol adaptor: $F(1, 7) = 68.09, p = 0.000, BGG-p = 0.01$ a target: $F(2, 14) = 13.88, p = 0.001, BGG-p = 0.01$. To znamená, že odchýlky pre laterálny adaptor boli väčšie ako pre frontálny. Podobná ANOVA bola vyhodnotená aj pre virtuálne prostredie, kde bol navyše faktor prostredie. Faktor adaptor je signifikantný: $F(1, 8) = 379.49, p = 0.000, BGG-p = 0.01$, target: $F(2, 16) = 7.88, p = 0.004, BGG-p = 0.05$ a aj interakcia medzi adaptorom a targetom: $F(2, 16) = 6.34, p = 0.001, BGG-p = 0.05$. Vo virtuálnom prostredí boli odchýlky väčšie pre laterálny adaptor.

Keďže prostredie nie je signifikantný faktor, dáta pre virtuálne prostredie sme spriemerovali a porovnali s reálnym prostredím pre laterálny adaptor na -45° . Faktorom bol iba target ($-33.75^\circ/-30^\circ, -22.5^\circ/-20^\circ, -11.25^\circ/-10^\circ$) a prostredie (reálne a virtuálne). Okrem targetu bol signifikantný aj faktor prostredie: $F(1, 15) = 85.76, p = 0.000, BGG-p = 0.01$. Odchýlky pre laterálny adaptor boli väčšie pre virtuálne prostredie ako reálne.

Výsledky vplyvu adaptoru na lokalizáciu targetov sú zhrnuté nasledovne. Laterálny adaptor ovplyvňoval vo veľkej miere práve targety najbližšie k nemu, či už v reálnom alebo virtuálnom prostredí. So vzdialenosťou od adaptoru odchýlky pre dané targety klesali a odchýlky sú v smere od prehrávaného adaptoru.

Odchýlky pre frontálny adaptor boli menšie ako pre laterálny. A adaptor mal na lokalizáciu väčší vplyv vo virtuálnom prostredí ako v reálnom.

Keďže kontextuálna plasticita sa prejavuje pri prehrávaní adaptoru z fixnej pozície ako odchýlka v lokalizácii a výsledky ukazujú odchýlky v lokalizácii, hypotéza sa potvrdila. Kontextuálna plasticita sa prejavila aj pri pasívnom počúvaní kontextu a prejavila sa aj vo virtuálnom prostredí.

Nadhodnocovanie odpovedí a taktiež väčšie odchýlky vo virtuálnom prostredí mohli byť spôsobené tým, že poslucháči pri neistote ohľadom interpretácie virtuálne prezentovaných stimulov používali viac relatívnych odpovedí. Dôvodom môže byť aj vynechanie adaptoru na $\pm 90^\circ$. V reálnom prostredí mali poslucháči ohraničené priestorové vnímanie vďaka tomuto adaptoru a to im pomáhalo presnejšie lokalizovať pozíciu targetu. Vo virtuálnom prostredí adaptor na $\pm 90^\circ$ prehrávaný nebol, teda účastníci ho nemohli použiť ako referenciu pri ďalšej lokalizácii.

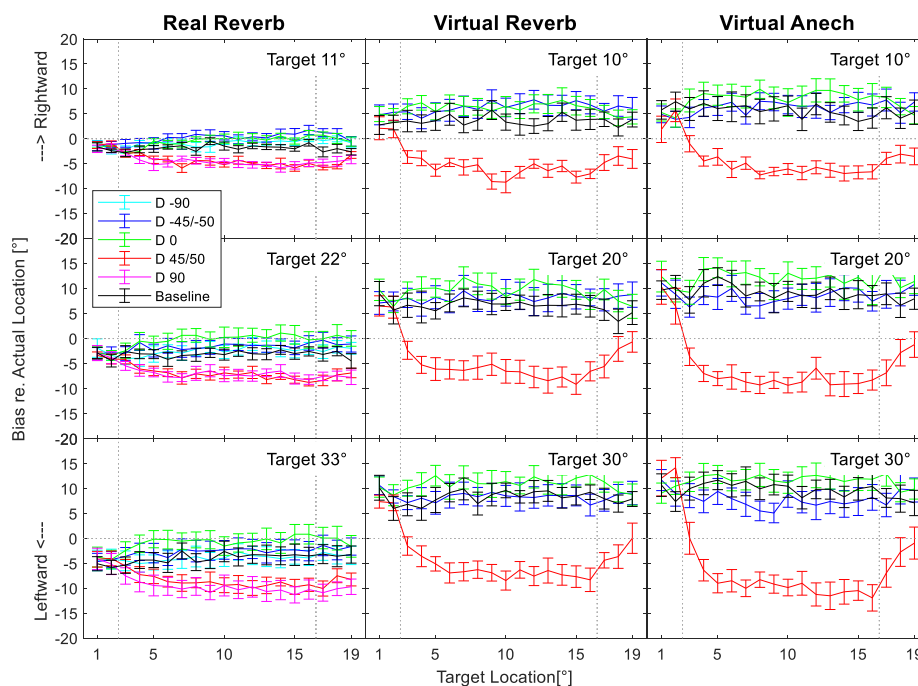
5.2 Temporálny profil adaptácie

V tejto časti je analyzovaný vplyv adaptoru na lokalizáciu targetov v priebehu kola. Graf (Obr. 20) zobrazuje odchýlky spriemerované cez účastníkov pre každý subrun v priebehu kola. Každý riadok zobrazuje dáta pre jeden z pravých targetov. Prvý riadok zobrazuje výsledky pre target na 11.25° v reálnom a 10° vo virtuálnom prostredí. Druhý riadok zobrazuje výsledky pre targety na 22.5° a 20° a tretí pre targety na 33.75° a 30° . Používame preklopené dáta, takže pre ľavé targety sú výsledky symetrické. V jednom kole bolo 19 subrunov, ktoré sa delili na predadaptačné, adaptačné a postadaptačné. Tieto časti jednotlivých kôl sú oddelené sivou vertikálnou čiarou.

Odchýlky pre baseline kolo rástli veľmi pomaly. Výsledky pre baseline kolo v reálnom prostredí boli vyhodnotené pomocou ANOVY, kde bol faktor subrun (1 až 19) a pozícia targetu (11.25° , 22.5° a 33.75°). Subrun vyšiel ako signifikantný faktor: $F(18, 126) =$

2.86, $p = 0.000$, $BGG-p = 0.05$ a významná je aj interakcia medzi subrunom a targetom: $F(36, 252) = 1.50$, $p = 0.041$, $BGG-p = 1.0$. Vo virtuálnom prostredí pri faktore subrun (1 až 19), target (10° , 20° , 30°) a prostredie (virtuálne reverberantné a anechoické) subrun ako významný nevyšiel, ale target áno: $F(2, 16) = 5.76$, $p = 0.013$, $BGG-p = 0.05$.

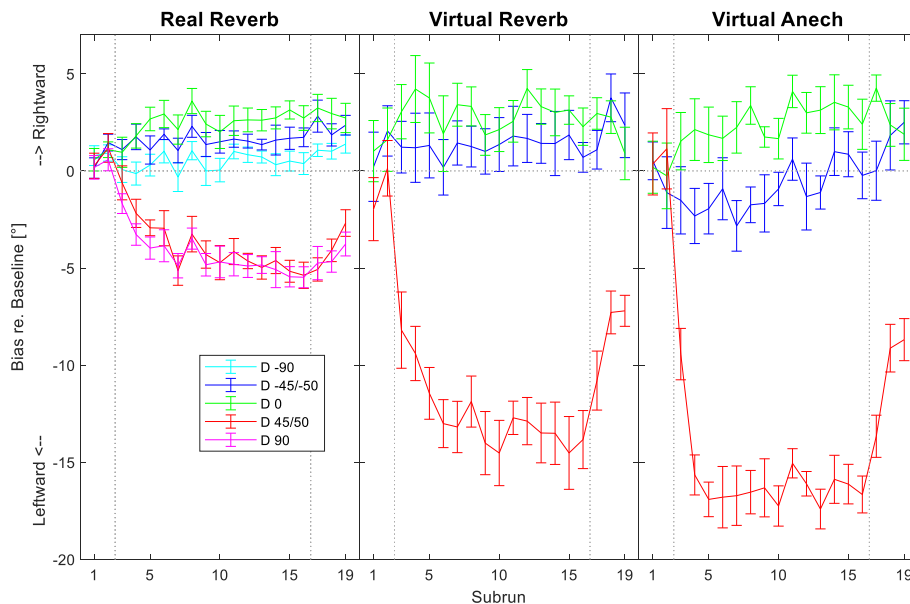
Výsledky pre reálne prostredie sú prekvapivé, pretože sme predpokladali, že subrun významný nebude, keďže počas baseline kola nebol prehrávaný žiaden adaptor.



Obr. 20. Odchýlky v priebehu kola pre trojicu targetov

Rôzne hodnoty pre jednotlivé kontextuálne kolá ukazujú, že vývin kontextuálnej plasticity závisel od pozície adaptora. Pre frontálny adaptor rástla kontextuálna plasticita pomaly. Pre ipsilaterálne adaptory, ktoré boli na rovnakej strane ako targety, rástla kontextuálna plasticita rýchlo a pre kontralaterálne adaptory sa kontextuálna plasticita vyvíjala pomalšie. Pri všetkých kontextuálnych kolách kontextuálna plasticita mierne rástla na začiatku adaptačnej časti, v priebehu adaptačnej časti zostávala približne nezmenená a v postadaptačnej rýchlo klesla.

Vývin pre jednotlivé pozície targetov bol podobný a aj napriek tomu, že vo virtuálnom prostredí bola pozícia targetu označená ako signifikantný faktor, na ďalšom grafe sme sa zamerali na analýzu po spriemerovaní cez target pozície a po odčítaní baseline dát.



Obr. 21. Odchýlky v priebehu kola spriemerované cez trojicu targetov

Najvyššie odchýlky spôsobila kontextuálna plasticita pre ipsilaterálne adaptory, teda na 90° a 45° alebo 50° . Vo virtuálnom anechoickom prostredí rástla kontextuálna plasticita najrýchlejšie. Pri 5. subrune bola dosiahnutá najvyššia hodnota odchýlok a počas adaptačnej časti hodnota odchýlky pretrvávala. Podobný trend bol aj v reálnom reverberantnom a virtuálnom reverberantnom prostredí, no kontextuálna plasticita rástla pomalšie a najvyššie hodnoty boli dosiahnuté až pri 8. alebo 9. subrune. Pre kontralaterálne adaptory, adaptory na pozíciách -90° , $-45^\circ/-50^\circ$, sa kontextuálna plasticita vyvíjala pomaly a bola približne rovnaká vo všetkých prostrediach. Vo virtuálnom anechoickom na začiatku mierne klesla a od polovice kola začala mierne stúpať. V kole, kde bol prehrávaný frontálny adaptor, začala mierne rásť na začiatku adaptačnej časti. V postadaptačnej časti začala klesať, najmä vo virtuálnom prostredí a mierne aj v reálnom reverberantnom prostredí.

Celkové odchýlky spôsobené prítomnosťou kontextuálnej plasticity boli najnižšie v reálnom reverberantnom prostredí, kde dosahujú hodnoty približne 4° až -6° . Vyššie hodnoty odchýlok boli vo virtuálnom reverberantnom prostredí s hodnotami 5° až -16°

a najviac prítomnosť kontextuálnej plasticity ovplyvnila odpovede vo virtuálnom anechoickom prostredí. Hodnoty odchýlok sa pohybovali v intervale 5° až -19°.

ANOVA bola v reálnom prostredí použitá pre faktory adaptor (všetkých 5 pozícií) a pre faktor subrun (1 až 19). Signifikantný výsledok vyšiel pre adaptor: $F(4, 28) = 57.66, p = 0.000, BGG-p = 0.01$, subrun: $F(18, 126) = 3.14, p = 0.000, BGG-p = 0.05$ a interakciu pre adaptor a subrun: $F(72, 504) = 9.58, p = 0.000, BGG-p = 0.01$. To znamená, že odchýlky boli signifikantne odlišné pre ipsilaterálne adaptory (45°, 90°). Taktiež bol rozdiel v odchýlkach medzi adaptačnými subrunmi a predadaptačnými alebo posledným postadaptačným.

Pre virtuálne prostredie vyšli ANOVY nasledovne. Pre faktor adaptor (-50°, 0° a 50°), subrun (1 až 19) a prostredie (virtuálne reverberantné a anechoické) vyšiel signifikantný faktor adaptor: $F(2, 16) = 192.76, p = 0.000, BGG-p = 0.01$, subrun: $F(18, 144) = 5.79, p = 0.000, BGG-p = 0.01$ a interakcia adaptor a subrun: $F(36, 288) = 36.10, p = 0.000, BGG-p = 0.01$. Opäť bol signifikantný rozdiel medzi ipsilaterálnym adaptorom a ostatnými adaptormi a rozdiel bol aj medzi predadaptačnými, postadaptačnými a adaptačnými subrunmi.

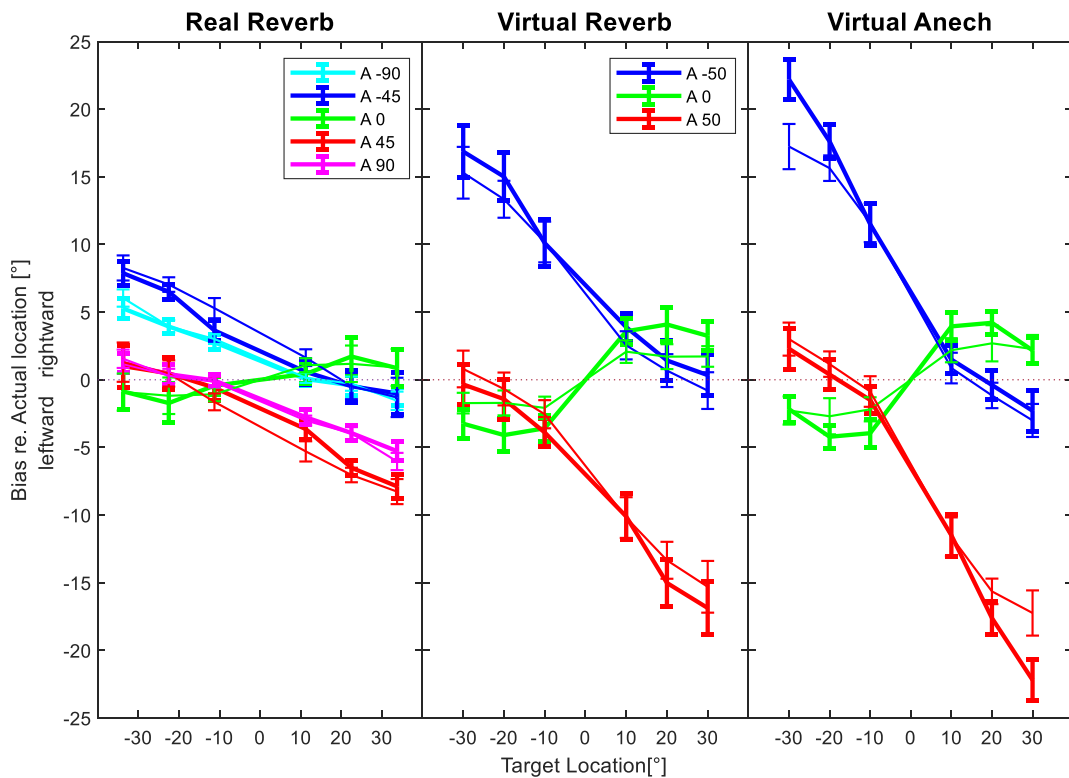
Keďže prostredie nie je signifikantný faktor vo virtuálnom prostredí, výsledky boli spriemerované a porovnané s reálnym prostredím. ANOVA vyhodnotila výsledky pre faktory adaptor (-45°/-50°, 0°, 45°/50°), subrun (1 až 19) a prostredie (reálne a virtuálne). Ako v predchádzajúcich ANOVÁCH, faktor adaptor aj subrun vyšiel signifikantný: $F(2, 30) = 233.95, p = 0.000, BGG-p = 0.01, F(18, 270) = 6.49, p = 0.000, BGG-p = 0.01$. Faktor prostredie tiež vyšiel signifikantne: $F(1, 15) = 53.95, p = 0.000, BGG-p = 0.01$ a aj interakcia adaptor a subrun: $F(36, 540) = 43.70, p = 0.000, BGG-p = 0.01$, interakcia adaptor a prostredie: $F(2, 30) = 40.30, p = 0.000, BGG-p = 0.01$ interakcia medzi subrunom a prostredím: $F(18, 270) = 2.85, p = 0.000, BGG-p = 0.05$ a interakcia všetkých troch faktorov: $F(36, 540) = 8.91, p = 0.000, BGG-p = 0.01$.

Týmito výsledkami sa potvrdilo, že kontextuálna plasticita (odchýlky v lokalizácii) je silnejšie pre virtuálne prostredie ako pre reálne prostredie. V oboch prostrediach boli odchýlky väčšie, ak bol prehrávaný blízky adaptor a odchýlky boli väčšie aj v adaptačnej časti, kde bol prehrávaný adaptor.

V nasledujúcej časti sú dáta rozdelené na 2 časti. Prvú časť tvoria dáta, kde bol pred target stimulom prehrávaný tiež target stimul a druhú časť tvoria dáta, kde bol pred target

stimulom prehrávaný adaptor stimul. Pri takomto rozdelení je možné pozorovať okamžitý vplyv kontextuálnej plasticity na lokalizáciu targetov. Skripty na rozdelenie dát a vykreslenie odchýlok pre obe typy predchádzajúcich stimulov boli poskytnuté doc. Gabrielou Andrejkovou, PhD.

Obr. 22 zobrazuje odchýlky v odpovediach pre prevrátené dáta vzhľadom na baseline. Hrubá čiara zobrazuje odchýlky, ak bol pred daným target stimulom prehrávaný adaptor a tenká čiara zobrazuje odchýlky, keď bol predchádzajúci stimul target.



Obr. 22. Odchýlky pri predchádzajúcom type stimulu target alebo adaptor

Výsledky sú pre obe podmienky podobné. Pri frontálnom adaptore a adaptoroch na 45° a -45° nebol veľký rozdiel v odchýlkach, keď bol predchádzajúci stimul target alebo adaptor. Približne 1.5° rozdiel bol pri targete na 11.25° , ak bol prehrávaný ipsilaterálny adaptor. Pre laterálne adaptory vo virtuálnych prostrediach boli rozdiely v odchýlkach $1-2^\circ$, s výnimkou najbližšieho targetu pri adaptore vo virtuálnom anechoickom prostredí. Rozdiel v odchýlkach, ak bol predchádzajúci stimul target alebo adaptor bol približne 5° . Výsledky boli vyhodnotené pomocou ANOVY. Testy pre reálne prostredie, kde sme

pozorovali, či mal na odchýlky vplyv typ predchádzajúceho stimulu, nevyšli signifikantne. Faktory boli adaptory (-90° až 90°), targety (11.25° až 33.75°) a typ predchádzajúceho stimulu (adaptor alebo target). Výsledok pre faktor predchádzajúci trial bol: $F(1, 7) = 2.09, p = 0.192, BGG-p = 1.00$. Rovnaké porovnanie sme vyhodnotili aj vo virtuálnom prostredí. Faktormi bol adaptor (-50°, 0° a 50°), target (10° až 30°), typ predchádzajúceho stimulu (adaptor alebo target) a prostredie (virtuálne reverberantné a anechoické). Signifikantne vyšli nasledujúce interakcie s typom predchádzajúceho stimulu: adaptor a predchádzajúci stimul: $F(2, 16) = 7.56, p = 0.005, BGG-p = 0.01$, prostredie a predchádzajúci stimul: $F(1, 8) = 5.76, p = 0.043, BGG-p = 0.05$, target a predchádzajúci stimul: $F(2, 16) = 5.10, p = 0.019, BGG-p = 0.05$, adaptor, target a predchádzajúci stimul: $F(2, 16) = 0.36, p = 0.703, BGG-p = 0.05$, target, prostredie a predchádzajúci stimul: $F(4, 32) = 4.41, p = 0.006, BGG-p = 0.1$.

Ďalej bol vyhodnotený tento faktor iba pre frontálny adaptor vo virtuálnom prostredí a faktorom bol opäť target (10° až 30°), prostredie a typ predchádzajúceho stimulu. Signifikantne vyšiel typ predchádzajúceho stimulu: $F(1, 8) = 8.47, p = 0.02, BGG-p = 0.05$. Pri ďalšej ANOVE zostali faktory rovnaké, s tým, že výsledky boli porovnávané pre laterálny adaptor na 50° a faktor target bol pre všetky pozície. Aj pri tomto teste vyšiel typ predchádzajúceho stimulu signifikantne: $F(1, 8) = 10.68, p = 0.011, BGG-p = 0.05$.

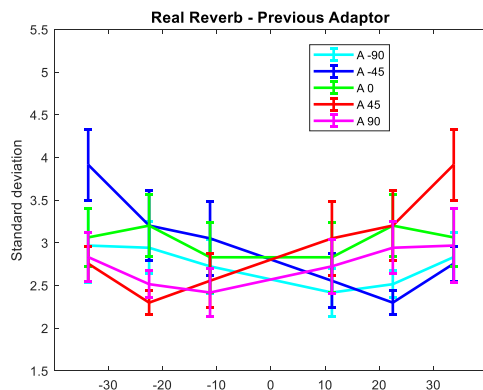
Výsledky ukazujú, že adaptor ovplyvňoval aj krátkodobu lokalizáciu a odchýlky sa zvyšovali. Tento efekt je však iba vo virtuálnom prostredí. Mohlo to byť spôsobené neistotou poslucháčov v lokalizácii stimulov vo virtuálnom prostredí, a tým pádom odpovedali prevažne vzhľadom na adaptor.

Pre dáta zobrazené na grafe (Obr. 22) sme vypočítali aj štandardnú odchýlku. Rozdelili sme dáta na dáta s predchádzajúcim stimulom targetom alebo adaptorom a použili sme 10 posledných adaptačných subrunov. Následne boli dáta preklopené podľa postupu pre štandardnú odchýlku.

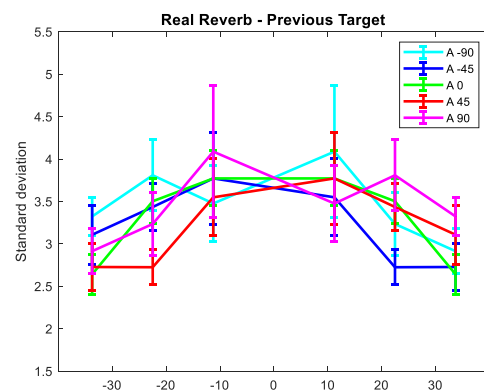
Predpokladáme, že štandardné odchýlky budú väčšie, ak bol predchádzajúci stimul adaptor, keďže v predchádzajúcej časti sme videli, ako prítomnosť adaptoru ovplyvnila lokalizáciu. A naopak predpokladáme, že prítomnosť targetov neovplyvní lokalizáciu, odpovede budú stabilnejšie a teda aj štandardné odchýlky budú menšie.

Naša hypotéza je, že štandardné odchýlky budú väčšie, ak bol predchádzajúci stimul adaptor.

Grafy (Obr. 23 a Obr. 24) zobrazujú štandardné odchýlky v reálnom prostredí. Prvý graf (Obr. 23) zobrazuje výsledky, ak lokalizovanému targetu predchádzal adaptor stimul a druhý graf (Obr. 24) zobrazuje výsledky, ak targetu predchádzal iný target stimul. Baseline kolo do výsledkov nezahrnieme ani pre virtuálne prostredie, pretože v tomto kole adaptor prítomný nebol.



Obr. 23. Štandardná odchýlka v reálnom prostredí s predchádzajúcim adaptor stimulom



Obr. 24. Štandardná odchýlka v reálnom prostredí s predchádzajúcim target stimulom

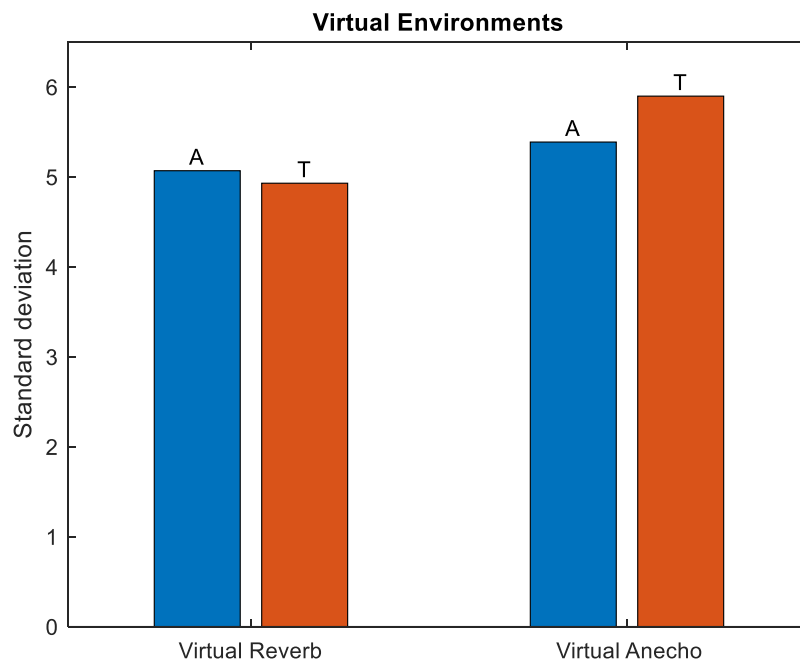
Ak bol predchádzajúci stimul adaptor, štandardné odchýlky klesali so vzdialenosťou targetu od prehrávaného adaptoru na 45° a 90°. Ak bol predchádzajúci stimul target, štandardné odchýlky klesali so vzdialenosťou od frontálneho adaptoru, no mierne stúpali pre laterálne adaptory. Pomocou ANOVY sme vyhodnotili, či je typ predchádzajúceho stimulu signifikantný faktor. ANOVA s faktormi adaptor (-90° až 90°), target (11.25° až 33.75°) a typom predchádzajúceho stimulu (adaptor a target) vyšla nasledovne. Typ predchádzajúceho stimulu: $F(1, 7) = 16.02$, $p = 0.0005$, $BGG-p = 0.01$, adaptor: $F(4, 28) = 4.17$, $p = 0.01$, $BGG-p = 0.05$, interakcia target a typ predchádzajúceho stimulu: $F(2, 14) = 9.21$, $p = 0.003$, $BGG-p = 0.05$.

Štandardné odchýlky boli signifikantne vyššie ak bol predchádzajúci stimul target a nie adaptor. Hypotéza bola vyvrátená, pretože sme predpokladali, že štandardné odchýlky budú vyššie pre predchádzajúci adaptor stimul.

Poslucháči vedeli s menšou variabilitou lokalizovať targety, ak bol prehrávaný predchádzajúci stimul adaptor. Je možné, že 12 klikov, ktoré tvorilo adaptor, pomohlo stabilizovať priestorové vnímanie a následne odpovede potom boli stabilnejšie. Avšak ak

bol predtým prehrávaný target, ktorý tvoril iba jeden klik, priestorové vnímanie poslucháča sa neprispôbilo prehrávanému targetu, a tak variabilita pri lokalizácii následného targetu bola vysoká.

Výsledky pre virtuálne prostredie sú vykreslené ako bar grafy, pretože faktor target, adaptor, prostredie a ani ich interakcie neboli signifikantné (p hodnota > 0.05). Faktory boli adaptor (-50° až 50°), target (10° až 30°), prostredie a predchádzajúci stimul. Následne boli štandardné odchýlky pre frontálny adaptor spriemerované cez pozície targetov (10° až 30°) a vykreslené na nasledujúcom grafe, kde „A“ je predchádzajúci stimul adaptor a „T“ je target. ANOVA s faktormi prostredie a typ predchádzajúceho stimulu vyšla signifikantne pre interakciu prostredie a predchádzajúci stimul: $F(1, 8) = 5.60$, $p = 0.05$, $BGG-p = 0.05$.



Obr. 25. Štandardné odchýlky vo virtuálnych prostrediach

Vo virtuálnom reverberantnom prostredí typ predchádzajúceho stimulu neovplyvnil lokalizáciu targetov a vo virtuálnom anechoickom bola štandardná odchýlka vyššia, ak bol predchádzajúci stimul target. Ani vo virtuálnom prostredí sa naša hypotéza nepotvrdila a väčšia variabilita pri lokalizácii je, ak je predtým prehrávaný target. Opäť mohli poslucháči používať adaptor ako referenciu pri lokalizovaní následného targetu, no vo virtuálnom reverberantnom prostredí tento spôsob pravdepodobne nepoužívali.

5.3 Výsledky pre porovnanie modelov CP

Táto kapitola sa zameriava na porovnávanie kontextuálnej plasticity v kontexte modelov Carlile et al. (2001) a Lingner et al. (2018). Z modelov vyplývajú opačné predikcie pre výsledky lokalizácie po adaptácii. Prvý model predikuje zhoršenie schopnosti rozlišovať lokácie pre targety blízko adaptora a druhý model predikuje zlepšenie schopnosti rozlišovať lokácie pre targety blízko adaptora.

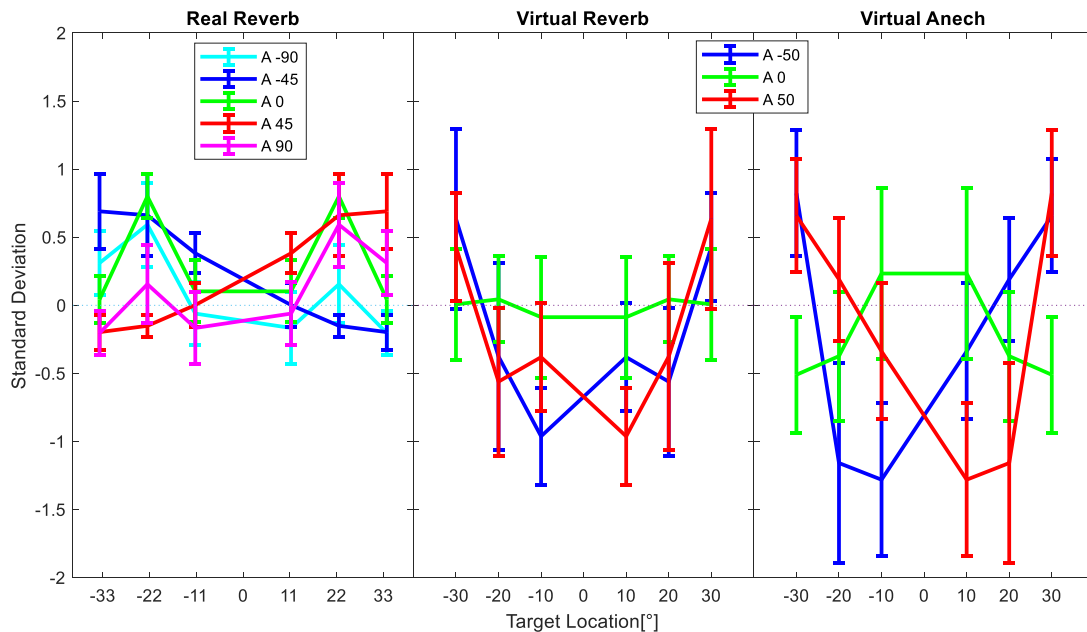
Tieto predikcie boli porovnávané pre výsledky z experimentov v reálnom a virtuálnom prostredí, kde bola pozorovaná kontextuálna plasticita. Výsledky lokalizácie sa vyhodnocovali pomocou štandardnej odchýlky v lokalizácii participantov, pomocou korelácie medzi odpoveďami participantov a reálnou pozíciou targetu a pomocou miery informačného prenosu.

Naša hypotéza je, že výsledky pre kontextuálnu plasticitu budú viac konzistentné s prvým modelom. Z toho vyplýva, že predikujeme zhoršenie separácie zvukov v blízkosti adaptora. Očakávame, že štandardné odchýlky budú najvyššie pre targety blízko adaptora, pretože to by znamenalo zníženie schopnosti rozlíšiť lokáciu targetu. Taktiež očakávame, že hodnoty pre koreláciu a informačný prenos budú nižšie pre targety, ktoré sú v blízkosti prehrávaného adaptora.

5.3.1 Štandardná odchýlka v odpovediach

Na porovnanie predikcií bola ako prvá použitá štandardná odchýlka. Dáta boli preklopené podľa postupu opísaného pre štandardnú odchýlku. Takto upravené dáta sú zobrazené na grafe (Obr. 26) vzhľadom na baseline. Taktiež je zobrazená aj štandardná chyba priemeru participantov pre jednotlivé podmienky.

ANOVA s faktormi adaptor (-90° až 90°), target (11.25° až 33.75°) v reálnom prostredí vyhodnotila, že adaptor je signifikantný faktor: $F(4, 28) = 5.74$, $p = 0.002$, $BGG-p = 0.01$. Signifikantný rozdiel je v odchýlkach pre adaptory na -90°, -45° a ostatnými adaptormi. Štandardná odchýlka je menšia, ak boli prehrávané vzdialené adaptory.



Obr. 26. Štandardné odchýlky vzhľadom na baseline

Ďalej bola použitá ANOVA pre laterálny adaptor na 45° a faktorom bola pozícia targetu (-33.75° až 33.75°). Target vyšiel ako signifikantný faktor: $F(5, 35) = 5.99, p = 0.000, BGG-p = 0.01$. Tento výsledok potvrdzuje, že štandardná odchýlka je väčšia pre blízke targety (11.25° až 33.75°) ako pre vzdialené targety na -11.25° až -33.75°.

Pre virtuálne prostredie boli vyhodnotené faktory adaptor (-50° až 50°), targety (10° až 30°) a prostredie (virtuálne reverberantné a anechoické). ANOVA vyhodnotila signifikantne interakciu adaptoru a targetu: $F(4, 32) = 4.61, p = 0.005, BGG-p = 0.05$. Pre laterálne adaptory (-50° a 50°), targety (10° až 30°) a prostredie vyšla signifikantne target pozícia: $F(2, 16) = 4.93, p = 0.022, BGG-p = 0.05$. Štandardné odchýlky sú najvyššie pre targety v blízkosti adaptoru, ale zároveň aj pre targety, ktoré boli od adaptoru najďalej. Keďže prostredie nebol signifikantný faktor, spriemerovali sme dáta pre virtuálne prostredia a použili sme ANOVU pre laterálny adaptor na 50° pre targety (-30° až 30°). Target vyšiel ako signifikantný: $F(5, 40) = 3.63, p = 0.01, BGG-p = 0.05$.

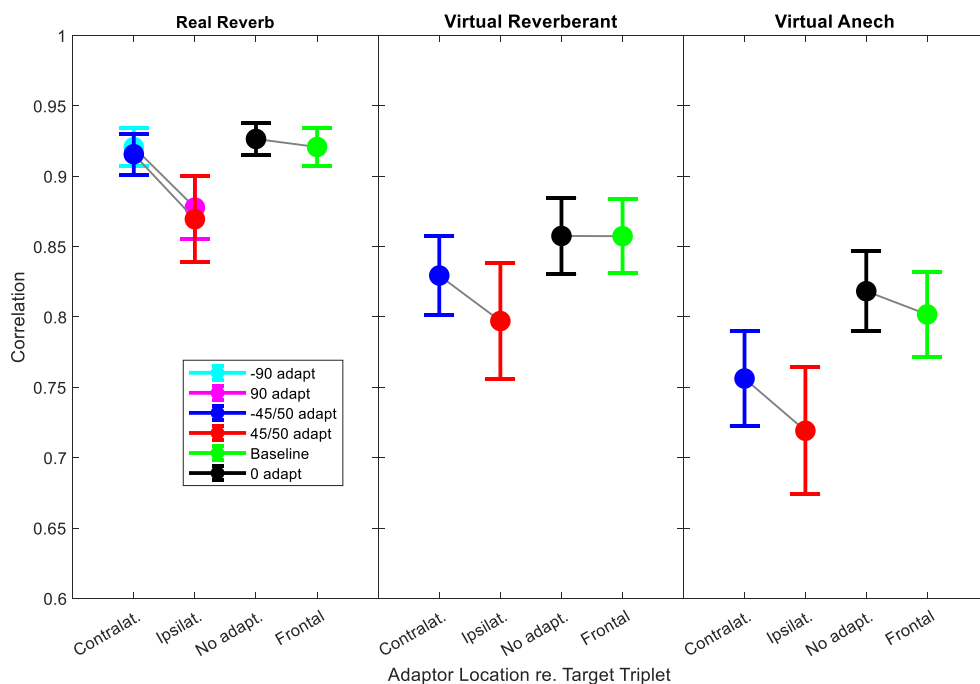
Pri laterálnom adaptore v reálnom prostredí vyšla pozícia targetu signifikantne. Štandardná odchýlka je najvyššia pre target pri adaptore a postupne klesala so vzdialenosťou od adaptoru.

Tieto výsledky sú konzistentné s prvým modelom. Na druhú stranu, výsledky pre virtuálne prostredie sú viac konzistentné s modelom Lingner et al. (2018). Síce

štandardná odchýlka je pre najbližší target vysoká, no následne rýchlo klesá a od druhého najbližšieho targetu po najvzdialenejší target začína stúpať. Taktiež tieto odchýlky sú menšie ako pri baseline. Prítomnosť adaptora pomohla zmenšiť variabilitu odpovedí pre blízke targety s výnimkou najbližšieho. So vzdialenosťou od adaptora potom štandardné odchýlky rastú opäť ku hodnote blízkej pre baseline.

5.3.2 Korelácia

Na grafe (Obr. 27) sú zobrazené korelácie medzi reálnou pozíciou targetov a odpoveďou participantov. Výsledky boli vypočítané a prevrátené podľa postupu pre korelácie. Výsledky sú vykreslené pre kontralaterálne, ipsilaterálne adaptory z pohľadu pre pravé targety, ale výsledky pre ľavé targety sú symetrické. Taktiež sú zobrazené korelácie v baseline kole a pri prehrávanom adaptore na 0°.



Obr. 27. Korelácie medzi odpoveďami participantov a reálnou pozíciou targetu

Korelácia pre kontralaterálne adaptory s hodnotou približne 0.93 v reálnom prostredí je vyššia ako korelácia pre ipsilaterálne adaptory s hodnotou približne 0.87. Taktiež korelácie v baseline kole sú mierne vyššie ako pre frontálny adaptor v reálnom prostredí.

ANOVA s faktormi adaptor (kontralaterálny -45° a -90° , ipsilaterálny na 45° a 90° , baseline a 0°): $F(5, 35) = 5.83$, $p = 0.001$, $BGG-p = 0.05$. Signifikantný rozdiel je medzi kontralaterálnymi adaptormi a ipsilaterálnymi.

Vo virtuálnom prostredí korelácie nadobúdajú vyššie hodnoty pre kontralaterálne adaptory ako pre ipsilaterálne. Vo virtuálnom reverberantnom prostredí sú to hodnoty približne 0.83 a 0.80 a vo virtuálnom anechoickom sú to hodnoty 0.76 a 0.7. Korelácie vo virtuálnom reverberantnom prostredí sú pre baseline a frontálny adaptor podobné, no vo virtuálnom anechoickom sú korelácie pre baseline vyššie ako pre frontálny adaptor. Porovnávané hodnoty sú približne 0.83 a 0.8. ANOVA pre faktory adaptor (kontralaterálny -50° , 0° , ipsilaterálny 50° a baseline) a prostredie (virtuálne reverberantné a anechoické) vyhodnotila adaptor aj prostredie ako signifikantné faktory. Výsledky pre adaptor: $F(3, 24) = 5.82$, $p = 0.004$, $BGG-p = 0.05$ a pre prostredie: $F(1, 8) = 13.96$, $p = 0.006$, $BGG-p = 0.01$. Korelácia je signifikantne vyššia pre kontralaterálny adaptor ako pre ipsilaterálny. Taktiež sú korelácie vyššie pre virtuálne reverberantné ako pre virtuálne anechoické prostredie.

Pri porovnávaní reálneho a virtuálneho reverberantného prostredia vyšiel faktor prostredie signifikantne. Faktorom bol adaptor (kontralaterálny -50° /spriemerovaný kontralaterálny -90° a -45° pre reálne prostredie, 0° , ipsilaterálny 50° /spriemerovaný ipsilaterálny pre reálne prostredie a baseline) a prostredie (reálne alebo virtuálne reverberantné). Signifikantné boli obe faktory. Výsledky pre adaptor: $F(3, 45) = 8.07$, $p = 0.000$, $BGG-p = 0.01$ a prostredie: $F(1, 15) = 5.01$, $p = 0.041$, $BGG-p = 0.05$.

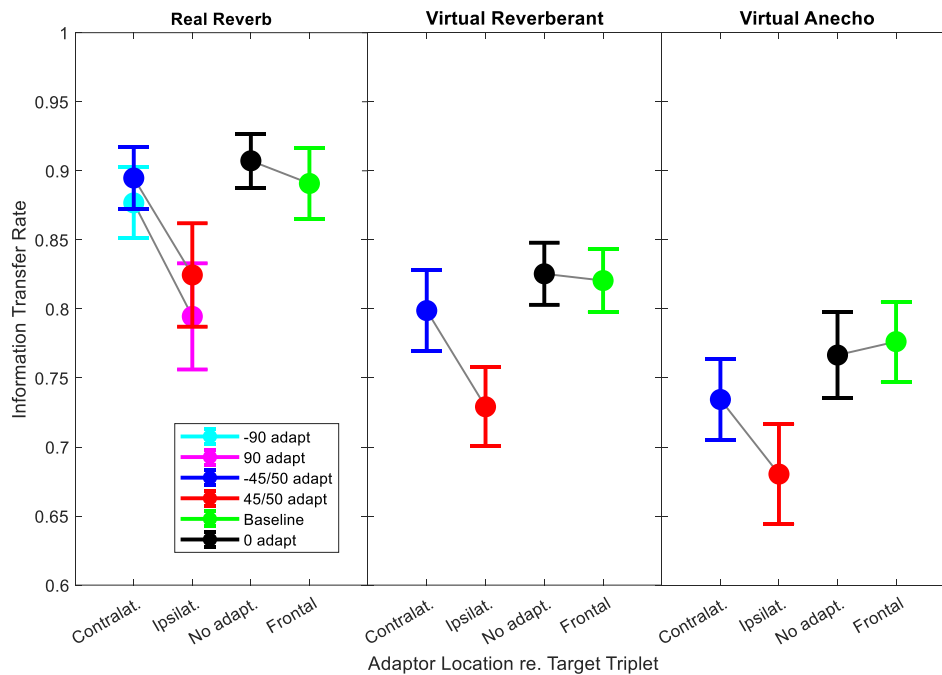
Celkovo sú korelácie najvyššie pre reálne reverberantné prostredie, nižšie sú pre virtuálne reverberantné a najnižšie pre virtuálne anechoické prostredie.

Poslucháči lepšie lokalizovali dané targety, ak bol prehrávaný vzdialený adaptor, a naopak, horšia lokalizácia bola pri prehrávaní blízkych adaptorov. Výsledky pre koreláciu potvrdzujú našu hypotézu, že lokalizácia bude horšia pre targety v blízkosti adaptoru, a teda sú konzistentné s modelom Carlile et al. (2001).

5.3.3 Informačný prenos v odpovediach

Predikcie pre lokalizáciu zvukov, ktoré vyplývajú pre adaptačné modely, boli porovnávané aj pomocou informačného prenosu. Výsledky sme vypočítali podľa postupu opísaného v kapitole zameranej na úprave dát pre informačný prenos.

Na grafe (Obr. 28) sú zobrazené výsledky pre pravé targety.



Obr. 28. Hodnota informačného prenosu pre trojicu targetov

Miera prenosu informácie je vyššia pre kontralaterálne adaptory, než pre ipsilaterálne. Informačný prenos pre baseline v reálnom a virtuálnom reverberantnom prostredí je mierne vyšší ako pre frontálny adaptor, no vo virtuálnom anechoickom je to opačne. ANOVA s faktorom adaptor (kontralaterálne, 0°, ipsilaterálne a baseline) vyhodnotila adaptor ako signifikantný: $F(5, 35) = 8.39$, $p = 0.000$, $BGG-p = 0.01$. Rozdiel je medzi kontralaterálnymi adaptormi a ipsilaterálnymi, no rozdiel medzi baseline a adaptorom na 0° nie je signifikantný.

ANOVA pre virtuálne prostredie, kde bol faktor adaptor (kontralaterálny, 0°, ipsilaterálny a baseline) a prostredie tiež vyhodnotila adaptor ako signifikantný: $F(3, 24) = 12.62$, $p = 0.000$, $BGG-p = 0.01$ a signifikantný je aj faktor prostredie: $F(1, 8) = 7.90$, $p = 0.023$, $BGG-p = 0.05$. Štatisticky významný rozdiel je medzi kontralaterálnym adaptorom a ipsilaterálnym, no medzi baseline a adaptorom na 0° rozdiel signifikantný nie je. Hodnota informačného prenosu je vyššia vo virtuálnom reverberantnom prostredí ako vo virtuálnom anechoickom. Pri porovnávaní reálneho a virtuálneho reverberantného prostredia, s rovnakými faktormi ako pri korelácii, vyšiel signifikantný rozdiel medzi prostrediami: $F(1, 15) = 5.71$, $p = 0.031$, $BGG-p = 0.05$. V reálnom prostredí sú hodnoty

informačného prenosu najvyššie, vo virtuálnom reverberantnom sú hodnoty druhé najlepšie a najnižšie hodnoty sú dosiahnuté vo virtuálnom anechoickom prostredí.

Podobne ako korelácie aj výsledky pre mieru informačného prenosu potvrdzujú našu hypotézu o konzistencii s modelom Carlile et al. (2001), pretože nižšia hodnota informačného prenosu pre ipsilaterálne adaptory indikuje zhoršenú lokalizáciu v blízkosti adaptora.

Pearsonov korelačný koeficient a miera informačného prenosu poskytujú približne rovnaké vyhodnotenia výsledkov pre kontextuálnu plasticitu. Výsledky pre štandardnú odchýlku tiež potvrdzujú hypotézu, avšak ukazujú istú konzistenciu aj pre model Lingner et al. (2018).

V reálnom prostredí výsledky ukazujú konzistentnosť iba pre Carlile et al. (2001) model. Prítomnosť adaptora spôsobuje odchýlky v lokalizácii, ale odchýlky sú spôsobené „únavou“ neurónov spôsobenou častou aktiváciou pri prehrávaní adaptora a nie sú spôsobené prispôbovaním sa receptívnych polí neurónov za účelom zlepšiť separáciu zvuku. Vo virtuálnom prostredí nižšie hodnoty pre koreláciu a informačný prenos ukazujú, že sú pri lokalizácii určité odchýlky, avšak výsledky pre štandardnú odchýlku naznačujú, že tieto odchýlky by mohli byť spôsobené prispôbovaním sa receptívnych polí za účelom zlepšiť separáciu zvukov.

Záver

Cieľom diplomovej práce bolo zistiť, či je potrebná aktívna účasť participantov pri počúvaní kontextu, aby sa prejavila kontextuálna plasticita. Výsledky ukázali, že aj pri pasívnom počúvaní kontextu môžeme pozorovať v lokalizácii vplyv kontextuálnej plasticity. Odchýlky v lokalizácii spôsobené vplyvom kontextuálnej plasticity sa prejavili aj vo virtuálnom prostredí a boli väčšie ako v reálnom prostredí. Pravdepodobne si participanti neboli istí ohľadom interpretácie virtuálne prezentovaných stimulov a používali viac relatívnych odpovedí. Mohli byť preto viac ovplyvnení prítomnosťou kontextuálnej plasticity.

Avšak pri porovnávaní odchýlok z krátkodobého hľadiska (vplyv typu predchádzajúceho stimulu na odpovede) bola hodnota štandardnej odchýlky podobná pre obe typy vo virtuálnych prostrediach, no signifikantne sa líšila pre reálne prostredie. Odchýlky v lokalizácii pre reálne prostredie boli menšie, no významne ich ovplyvňoval typ predchádzajúceho stimulu. Vo virtuálnom prostredí mali participanti určitú neistotu pri lokalizácii zvukov a od typu predchádzajúceho stimulu odchýlky záviseli iba mierne. V reálnom a mierne vo virtuálnom anechoickom prostredí boli odchýlky menšie, ak bol prehrávaný adaptor stimul. Pravdepodobne participanti používali adaptor ako „kotvu“ na stabilizovanie priestorového vnímanie, a preto bola následná lokalizácia presnejšia.

Ďalším cieľom bolo porovnať kontextuálnu plasticitu v kontexte adaptačných modelov Carlile et al. (2001) a Lingner et al. (2018). Výsledky pre kontextuálnu plasticitu sú viac konzistentné s prvým modelom. Prítomnosť adaptoru spôsobuje „únavu“ neurónov a participanti odpovedajú s určitými odchýlkami. Vo virtuálnom prostredí sú odchýlky pravdepodobne spôsobené aj prispôbovaním sa receptívnych polí, aby sa zlepšila separácia zvukov, ale iba do určitej miery.

V bežnom prostredí môže zvuk prichádzajúci dlhodobo z jedného miesta pôsobiť ako adaptor. Následne zvuky potom budeme lokalizovať s určitým posunom.

Ďalšími krokmi vo výskume by mohlo byť nahradenie zvukov adaptoru a targetu (jednoduché kliknutia) za zvuky, ktoré sa častejšie vyskytujú v našom prostredí. Napríklad určité slabiky alebo hovorené vety a skúmať do akej miery sa vyvinie kontextuálna plasticita pri týchto podmienkach.

Zoznam použitej literatúry

1. CARLILE, S. – HYAMS, S. – DELANEY, S. 2001. Systematic distortions of auditory space perception following prolonged exposure to broadband noise. In *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2001, vol. 110, no. 1, p. 416-424.
2. GRAY, R. M. 1990. Entropy and Information Theory. New York: Springer-Verlag. 1990. p. 306.
3. HLÁDEK, L. – TOMORIOVÁ, B. – KOPČO, N. 2017. Temporal characteristics of contextual effects in sound localization. In *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2017, vol. 142, no. 5, p. 3288-3296.
4. JEFFRESS, L. A. 1948. A place theory of sound localization. In *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 1948, vol. 41, no. 1, p. 35–39.
5. KOPČO, N. – ANDREJKOVÁ, G. 2020. Build-up of Contextual Plasticity in Anechoic and Reverberant Rooms. In *Forum Acusticum*. 2020.
6. KOPČO, N. – BEST, V. – SHINN-CUNNINGHAM, B.G. 2007. Sound localization with a preceding distractor. In *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2007, vol. 121, no. 1, p. 420-432.
7. KOPČO, N. 2009. Mechanizmy priestorového počutia a separácie zvukov: habilitačná práca. Košice: Univerzita Karlova v Praze, 2009. 93 s.
8. KOPČO, N. et al. 2015. Contextual plasticity, top-down, and non-auditory factors in sound localization with a distractor. In *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2015, vol. 137, no. 1, p. EL281-287.
9. KOPČO, N. et al. 2017. Streaming and sound localization with a preceding distractor. In *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2017, vol. 141, no. 1, p. EL331-EL337.
10. LINGNER, A. et al. 2018. A novel concept for dynamic adjustment of auditory space. In *Scientific Reports*. 2018, vol. 8, 8335.
11. LINKOVÁ, S. 2020. Sluchová kontextuálna plasticita vo virtuálnom prostredí: bakalárska práca. Košice: Univerzita Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach, 2020. 36 s.

-
12. MCALPINE, D. – JIANG, D. – PALMER, A.R. 2001. A neural code for low-frequency sound localization in mammals. In *Nature neuroscience*, 2001, vol. 4, p. 396-401.
 13. MILLER, G. A. – NICELY, P. E. 1955. An Analysis of Perceptual Confusions Among Some English Consonants. In *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1955, vol. 27, no. 2, p. 338-352.
 14. MOORE, B.C.J. 2003. *An Introduction to the Psychology of Hearing*, Elsevier Science, 2003. 413 s. ISBN 0-12-505628-1
 15. PIKOVÁ, V. 2018. Mechanizmy kontextuálnej plasticity v lokalizácii zvukov: bakalárska práca. Košice: Univerzita Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach, 2018. 35 s.
 16. SHANNON, C. E. 1948. A Mathematical Theory of Communication. In *The Bell System Technical Journal*, 1948, vol. 27, p. 379-423, 623-656.
 17. THURLOW, W. R. – JACK, CH. E. 1973. Some determinants of localization-adaptation effects for successive auditory stimuli. In *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1973, vol. 53, p. 1573.
 18. TOMORIOVÁ, B. et al. 2011. Spatial Aspects of Contextual Plasticity in Sound Localization. In *Forum Acusticum 2011*.

Prílohy

Príloha A: CD médium – diplomová práca v elektronickej podobe, prílohy v elektronickej podobe a zdrojové kódy experimentu a analýz dát

Príloha B: Používateľská príručka