

UNIVERZA V MARIBORU
FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO,
RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Gregor Kovačevič

ODSTRANJEVANJE AKUSTIČNEGA ODMEVA

Projektno delo

Maribor, avgust 2017

ODSTRANJEVANJE AKUSTIČNEGA ODMEVA

Projektno delo

Študent(ka): Gregor Kovačevič
Študijski program: Univerzitetni študijski program
Elektrotehnika
Smer: Elektronika
Mentor(ica): dr. Zdravko Kačič
Somentor(ica): /
Lektor(ica): /

KAZALO

1	UVOD	1
2	ZVOK	3
2.1	Lastnosti zvoka	4
3	AKUSTIČNI ODMEV	6
3.1	Vpliv oblike prostora na akustični odmev	7
3.2	Izračun odmeva v danem prostoru	8
3.3	Vpliv akustičnega odmeva na govor	9
4	ODSTRANJEVANJE AKUSTIČNEGA ODMEVA	10
4.1	Pasivno odstranjevanje akustičnega odmeva	10
4.1.1	Absorberji	10
4.1.2	Porozni absorberji	12
4.1.3	Membranski absorberji	16
4.1.4	Resonatorji	18
4.2	Aktivno odstranjevanje akustičnega odmeva	19
4.2.1	Problem konferenčnih sob s telefonijo preko internetnega protokola (Voice over Internet Protocol - VoIP)	20
4.2.2	Rešitev za konferenčne sobe	21
4.2.3	Težave algoritmov AEC	22
4.2.4	Celoten proces odstranjevanja odmeva	23
4.2.5	Primerjava različnih algoritmov	24
4.2.5.1	Algoritem najmanjše kvadratične napake	25
4.2.5.2	Algoritem normirane srednje kvadratične napake	27
4.2.5.3	Algoritem časovno spremenljive srednje kvadratične napake (time varying least mean square - TVLMS)	28
4.2.5.4	Rekurzivni algoritem srednje kvadratične napake (recursive least square RLS) ..	28
5	PREIZKUŠANJE ALGORITMOV V OKOLJU MATLAB	31
5.1.1	Postavitev okolja	31

5.1.2	Testiranje algoritma LMS	36
5.1.3	Testiranje algoritma NLMS	38
5.1.4	Testiranje algoritma RLS.....	40
5.1.5	Vpliv velikosti stopnice na delovanje LMS algoritma	43
6	ZAKLJUČEK	45
7	VIRI	47

KAZALO SLIK

SLIKA 2.1 ODVISNOST HITROSTI ZVOKA OD TEMPERATURE IN VLAGE [3].....	3
SLIKA 2.2: GRAF MINIMALNE GLASNOSTI ZVOKA, KI JE POTREBNA DA ČLOVEK ZAZNA TON PRI DOLOČENI FREKVENCI [5].....	5
SLIKA 3.1: PRIKAZ DIREKTNEGA ZVOKA IN ODMEVA [11]	6
SLIKA 3.2: Tloris prostora, pentagon. Na sliki je lepo vidno, da takšen prostor nima paralelnih sten, kar ugodno vpliva na manjši akustični odmev. [27].....	7
SLIKA 3.3: PRIKAZ PADANJA ZVOČNEGA TLAKA V PROSTORU (MERJENJE ČASA AKUSTIČNEGA ODMEVA) [14]	9
SLIKA 4.1: PRIKAZ Odboja, absorpcije in prehoda zvoka. Absorpcijski materiali imajo visok koeficient absorpcije, posledično se veliko zvočne energije absorbira, to je spremeni v notranjo energijo. [17].....	11
SLIKA 4.2: PRIMER panela poroznega absorberja umetne mase, ki se uporablja v prostorih za zmanjševanje akustičnega odmeva [28]	13
SLIKA 4.3: ODVISNOST KOEFICIENTA ABSORPCIJE POROZNIH MATERIALOV, OD FREKVENCE ZVOČNEGA VALOVANJA IN DEBELINE MATERIALA. Vidimo lahko da je absorpcija boljša pri srednjih in visokih frekvencah, ter debelejšem materialu. [19].....	15
SLIKA 4.4: NOTRANJA STRUKTURA POROZNEGA ABSORPCIJSKEGA MATERIALA. Na sliki je lepo vidno veliko praznega prostora, ki je potreben za učinkovito absorbiranje zvočne energije. [20]	15
SLIKA 4.5 GRAF KOEFICIENTA ABSORPCIJE MEMBRANSKEGA ABSORBERJA V ODVISNOSTI OD FREKVENCE. Na sliki je vidna ozkopasovna absorpcija zvočne energije. [29].....	17
SLIKA 4.6: HELMHOLTZOVI REZONATORJI. Na sliki so vidne različne oblike odprtin, ki služijo za absorpcijo različnih frekvenc in imajo tudi estetski značaj. [30]	19
SLIKA 4.7: VIZUALIZACIJA KONFERENČNE SOBE. »FAR SIDE« PREDSTAVLJA GOVORCA B, DO KATEREGA SE PRENESE GOVOR GOVORCA A. Tam se predvaja, ponovno zajame in pošlje nazaj govorcu A. Nastala je zanka, ki v govor vnaša akustični odmev. [21].....	20
SLIKA 4.8: »FAR END« SIGNAL NAM PREDSTAVLJA DALJNI, SPREJET GOVOR. Ta govor se pošlje kot referenca AEC algoritmu. S tem algoritmu definiramo kaj mora iz zajetega govora odstraniti. [24].....	21
SLIKA 4.9: USTVARJANJE OBRATNEGA SIGNALA S POMOČJO DIGITALNEGA FILTRA. Seštevek reference in obratnega signala je končni rezultat algoritma. [24]	22
SLIKA 4.10: CELOTEN PROCES ODSTRANJEVANJA ODMEVA [24]	24
SLIKA 4.11: ALGORITMI, KI SPREMINJAJO KOEFICIENTE DIGITALNEGA FILTRA SO LAHKO ITERATIVNI (LEVA VEJA) ALI REKURZIVNI (DESNA VEJA).....	25
SLIKA 4.12: V NAŠEM PRIMERU JE VHOD $x(n)$ ENAK REFERENCI GOVORA. Algoritem nastavlja parametra filtra tako, da je prenosna funkcija filtra ($\hat{h}(n)$) enaka prenosni funkciji	

REFERENCE ($H(N)$). ČE SIGNALA ODŠTEJEMO DOBIMO NAPAKO ($E(N)$), KI JO HOČEMO MINIMIZIRATI. [25].....	26
SLIKA 4.13: DIAGRAM RLS FILTRA [23]	29
SLIKA 5.1: FREKVENČNI ODZIV SOBE PRI GOVORCU A. S TEM FILTROM SPREMINJAMO DALJNI SIGNAL, TAKO DA TA USTREZNO PREDSTAVLJA PONOVRNO ZAJET ZVOK IZ ZVOČNIKOV, KI SE JE ODBIL OD STEN.	32
SLIKA 5.2: IMPULZNI ODZIV SOBE GOVORCA A NA DIRACOV IMPULZ. IMPULZNI ODZIV NAM, S POMOČJO IZRAČUNA KONVOLUCIJE VHODNEGA SIGNALA IN IMPULZNEGA ODZIVA, OMOGOČA IZRAČUN IZHODA SISTEMA ZA VSAK MOŽEN VHOD.....	33
SLIKA 5.3: GOVOR OSEBE A (BLIŽNJI SIGNAL). PO KONCU FILTRIRANJA ZAJETEGA SIGNALA HOČEMO, DA JE REZULTAT ČIM BOLJ PODOBEN TEMU SIGNALU. TAKO BI VEDELI, DA SMO UČINKOVITO ODSTRANILI DALJNI SIGNAL.	34
SLIKA 5.4: GOVOR OSEBE B (DALJNI SIGNAL) ZAJET NA STRANI UPORABNIKA A. GOVOR JE MODIFICIRAN Z EFEKTOM SOBE IN DUŠENJA. TO JE SIGNAL KATEREGA HOČEMO ELIMINIRATI IZ POGOVORA.....	35
SLIKA 5.5: CELOTEN POTEK POGOVORA. OBMOČJA Z VEČJO AMPLITUDO SO OBMOČJA GOVORA OSEBE A, OBMOČJA Z MAJHNO AMPLITUDA PA OBMOČJA ZAJEMA GOVORA OSEBE B NA STRANI GOVORCA A, PO TEM KO SE JE TA GOVOR TAM PREDVAJAL.	36
SLIKA 5.6: SKUPNO ZAJETI GOVOR NA STRANI OSEBE A, FILTRIRAN SKOZI ALGORITEM LMS Z VELIKOSTJO STOPNICE 0,1. OPAZITI JE, DA JE DALJNI GOVOR ŠE VEDNO PRISOTEN VENDAR Z ZMANJŠANO AMPLITUDO.	37
SLIKA 5.7: RAZLIKA MED FILTRIRANIM SIGNALOM IN ŽELENIM. VIDIMO LAHKO, DA SE KLJUB FILTRIRANJU, NA STRAN UPORABNIKA B PRENESE NJEGOV LASTEN GOVOR, KI PA IMA ZMANJŠANO AMPLITUDO. .	37
SLIKA 5.8: FILTRIRAN SIGNAL ZAJET NA STRANI UPORABNIKA A SKOZI ALGORITEM NLMS. OPAZIMO LAHKO, DA JE DALJNI SIGNAL SKORAJ V CELOTI ODSTRANJEN. RAZLIKO OPAZIMO ŠELE KOT POGLEDAMO ODŠTETA SIGNALA (SKUPNO ZAJET IN BLIŽNJI SIGNAL).	39
SLIKA 5.9: RAZLIKA MED FILTRIRANIM SIGNALOM IN BLIŽNJIM GOVOROM PREKO ALGORITMA NLMS. V PRIMERJAVI Z ALGORITMOM LMS JE OPAZNO MANJŠA RAZLIKA, KAR POMENI BOLJŠO ODSTRANJEVANJE AKUSTIČNEGA ODMEVA.	40
SLIKA 5.10: FILTRIRAN SIGNAL SKOZI ALGORITEM RLS. SIGNAL KI GA DOBIMO NA IZHODU ALGORITMA JE SKORAJ IDENTIČEN KOT BLIŽNJI SIGNAL, KAR GOVORI O ODLIČNEM ODSTRANJEVANJU ODMEVA.	41
SLIKA 5.11: KO OD FILTRIRANEGA SIGNALA SKOZI ALGORITEM RLS ODŠTEJEMO BLIŽNJI GOVOR, VIDIMO DA JE REŠITEV SIGNAL Z ZANEMARLJIVO AMPLITUDO. IZ TEGA SKLEPAMO, DA ALGORITEM ZELO HITRO SPREMINJA UTEŽI (HITRO KONVERGIRA) IN JE POSLEDIČNO ODLIČEN PRI ODSTRANJEVANJU AKUSTIČNEGA ODMEVA.	41
SLIKA 5.12: VPLIV RAZLIČNIH VELIKOSTI STOPNIC NA DELOVANJE ALGORITMA LMS	43

KAZALO TABEL:

TABELA 1: ODVISNOST KOEFICIENTA ABSORPCIJE RAZLIČNIH MATERIALOV OD FREKVENCE [20]..... 12

Odstranjevanje akustičnega odmeva

Ključne besede: akustični, odmev, odstranjevanje, algoritmi

Povzetek

Namen projektnega dela je seznanitev s celotnim procesom odstranjevanja akustičnega odmeva v konferenčnih sobah, ki zagotavlja ustrezno razumevanje govora. Ukvarja se s prostorsko akustiko in algoritmi, ki odpravljajo odmev pri prenosu govora preko prostoročnih telefonov ali telefonije preko internetnega protokola. V kolikor želimo dušiti odmev sobe v celotnem slišnem frekvenčnem področju, uporabimo pasivne mešane strukture, ki jih namestimo na stene, pogosto kombinacija poroznih absorberjev in resonatorjev. Za odstranjevanje akustičnega odmeva, ki ga zajame mikrofona, smo algoritme preizkusili v okolju MATLAB. Najboljša izbira za realizacijo na signalnem procesorju je algoritem NLMS, v prihodnosti s hitrejšimi signalnimi procesorji pa tudi RLS.

Acoustic echo cancellation

Key words: acoustic, echo, cancellation, algorithms

Abstract

The purpose of this project is to get familiar with the complete process of cancelling acoustic reverberation in conference rooms, which ensures good speech recognition. It is based on room acoustics and algorithms, which cancel echo that is made in hands-free or VoIP communication. In conference room, the reverberation from whole frequency spectrum is eliminated with mixed passive structures, such as porous materials and resonators which are placed on the walls. For elimination of echo, which is picked up by microphone, we tried different algorithms in MATLAB environment. The best pick for realization on digital signal processor currently is NLMS with RLS being the option in future when DSP's get faster.

Seznam uporabljenih kratic in simbolov:

AEC - (acoustic echo cancellation); Metoda odstranjevanja akustičnega odmeva

DSP – (digital signal processor); Signalni procesor

LMS - (least mean square); Metoda najmanjše kvadratične napake

NLMS - (normalized least mean square); Metoda normirane srednje kvadratične napake

TVLMS - (time varying least mean square); Metoda časovno spremenljive srednje kvadratične napake

RLS - (recursive least square); Metoda srednje kvadratične napake

VoIP - (voice over internet protocol); Telefonija preko internetnega protokola

1 UVOD

Akustika je področje, ki se ukvarja z raziskovanjem mehanskih valovanj. Njena najbolj temeljna tema je zvok. Obravnava mehanske lastnosti zvoka, obnašanje zvoka v prostoru (prostorska akustika), ter njegovo širjenje po prostoru. Del akustike je tudi zvočni odmev. Preučuje njegovo širjenje, odboj, ter v povezavi z ljudmi tudi njegov vpliv na razumevanje govora. S tehniškega stališča se nadalje ukvarja z odstranjevanjem akustičnega odmeva, ustvarjanjem ustreznih materialov in struktur za odstranjevanje odmeva, ter preučevanjem odmeva pri prenosu govora preko prenosnih linij, kot je internet (VoIP). Razvija tudi algoritme, s katerimi preprečimo prenos odmeva med govorcema, ki jih uporabljamo takoj za zajemom zvoka z mikrofonom.

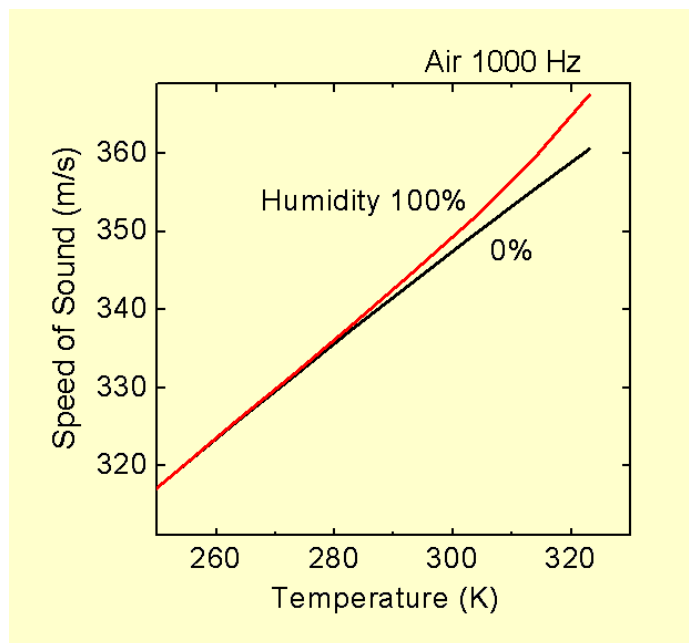
Namen projektnega dela odstranjevanja akustičnega odmeva je seznanitev z zaključeno celoto odstranjevanja odmeva, ki bi jo lahko realizirali v konferenčni sobi in posledično omogoča boljše razumevanje govora tako govorcev v prostoru, kot sogovorcev na drugi strani mikrofona. Zajema odstranjevanje odmeva v prostoru s pomočjo statičnih komponent, kjer je pomembna dobra prostorska akustika ter proces odstranjevanja akustičnega odmeva pri prostoročnih telefonskih pogovorih in telefonskih pogovorih preko internetnega protokola. Tudi tam je pomembna dobra prostorska akustika, saj ta zmanjšuje kompleksnost algoritmov, ki v tem primeru ne rabijo filtrirati odmeva sobe, temveč samo direkten zvok, ki se ponovno zajame z mikrofonom. Projektno delo vključuje tudi opredelitev različnih algoritmov, ki jih uporabljamo za filtriranje zvoka ter analizo njihovih prednosti in slabosti. Trenutno se na področju pasivnega odstranjevanja odmeva uporabljajo mešane strukture, ki zajemajo kombinacijo poroznih absorberjev in resonatorjev. Glede na namen prostora se uporabljajo tudi druge kombinacije z membranskimi absorberji. Aktivno se odmev iz govora zajetega z mikrofonom povečini odstranjuje z algoritmom normirane srednje kvadratične napake, ki je dokaj učinkovit ter preprost za implementacijo. V kolikor se zahteva boljša natančnost je realiziran algoritem časovno spremenljive srednje kvadratične napake.

Za spoznanje celotnega procesa odstranjevanja odmeva, najprej obravnavamo osnovne lastnosti zvoka ter sam nastanek odmeva. Sledi opis pasivnega odstranjevanja odmeva s pomočjo statičnih komponent, ki jih lahko namestimo v prostor, ter nato spoznavanje z različnimi algoritmi ter njihovimi principi delovanja. Končno je opisano tudi testiranje algoritmov in primerjava njihove učinkovitosti.

2 ZVOK

Da lahko spoznamo princip odmeva in njegovo odstranjevanje, moramo začeti z definicijo zvoka in njegovim širjenjem. Zvok je valovanje, ki nastane z vibriranjem objekta v prostoru in za svojo širjenje potrebuje določen medij. Nastane kot posledica mehanske sile na določen objekt, tako da ta objekt začne vibrirati [1]. Pri igranju na bobne na primer vibrira membrana bobna, ki v prostor oddaja zvočne valove. Pri govorjenju človeka, nastane zvok ob hitrem odpiranju in zapiranju (vibraciji) glasilk.

Zvok se lahko širi tako preko plinov, kapljev in trdnin, vendar ima vsako izmed stanj svoj vpliv na širjenje zvoka. Zvok se ne more širiti v vakuumu, saj tam ni medija za prenos valovanja. Zvok se najhitreje širi preko trdnin, slabše preko kapljev in najslabše preko plinov. Hitrost širjenja zvoka preko zraka je 343 m/s, pri sobni temperaturi (20 °C), preko vode 1484 m/s in preko železa 5120 m/s [4]. Razlog, da moramo ob hitrosti zvoka navajati temperaturo je, da na hitrost zvoka močno vpliva tudi temperatura, kjer večja temperatura pomeni hitrejše širjenje zvoka in nižja temperatura počasnejše širjenje zvoka [4]. Na hitrost zvoka vpliva tudi vlaga, vendar v manjši meri kot temperatura (slika 2.1).



Slika 2.1 Odvisnost hitrosti zvoka od temperature in vlage [3]

2.1 Lastnosti zvoka

Zvok lahko opredelimo s frekvenco in jakostjo zvoka (gostota energijskega toka zvočnega valovanja). Če zvok predstavimo kot nihanje, oziroma valovanje, predstavlja frekvenco zvoka sinusno nihanje molekul medija (če se zvok prenaša po zraku, to pomeni gibanje molekul zraka) [2]. V mediju tako nastajajo zgoščine in razredčine. V praksi frekvenca zvoka določa višino tona. Povprečen človek je sposoben zaznavati frekvence zvoka od 20 Hz do 20 kHz, najbolj občutljivi pa smo na frekvence v okolici treh kHz (pojav resonance v ušesnem sluhovodu). Zaznavanje frekvenc je močno pogojeno z okoljem v katerem je človek odraščal, prav tako se s staranjem območje zaznavanja frekvenc zoži. Visoke frekvence ljudje zaznavamo kot piskajoče tone, medtem ko nizke frekvence zaznavamo kot brnenje. Frekvence nižje od 20 Hz imenujemo infrazvok, tiste višje od 20 kHz pa ultrazvok [8].

Jakost zvoka določa gostota energijskega toka zvočnega valovanja [6]. Merimo jo v vatih na kvadratni meter in je enaka hitrosti zvoka pomnoženo z gostoto energije zvoka. Zaznavanje jakosti zvoka, imenujemo glasnost zvoka. Ker je uho logaritemsko občutljivo na jakost zvoka, je tudi definicija glasnosti enaka logaritemskemu razmerju, kot je vidno v enačbi (2.1).

$$J = 10 \log \left(\frac{j}{j_{\min}} \right) \quad (2.1)$$

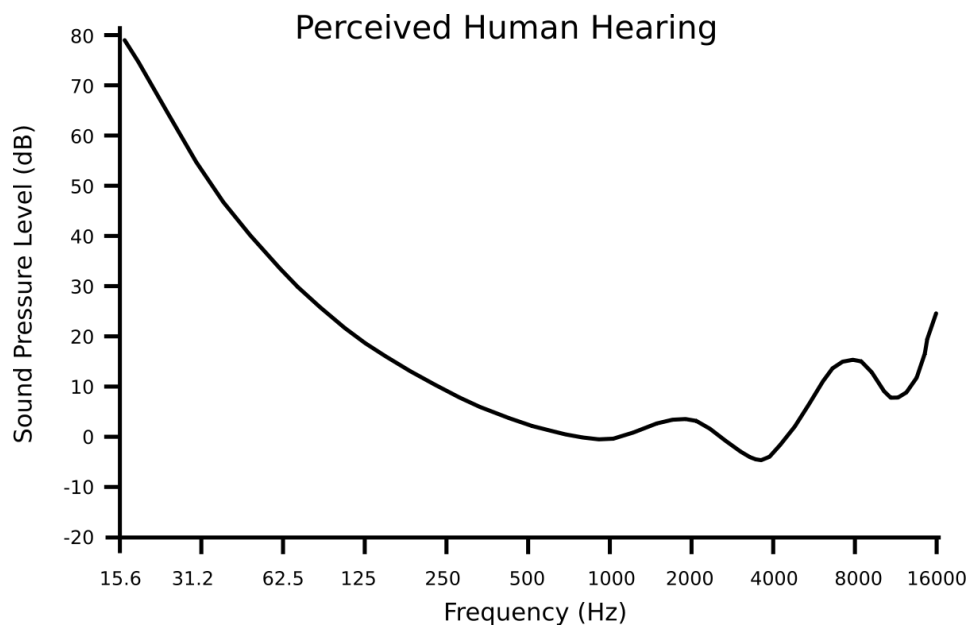
Pri tem je:

J – glasnost (dB),

j – gostota energije zvoka (W/m^2) in

j_{\min} – slušni prag, podan v obliki gostote energije zvoka (W/m^2).

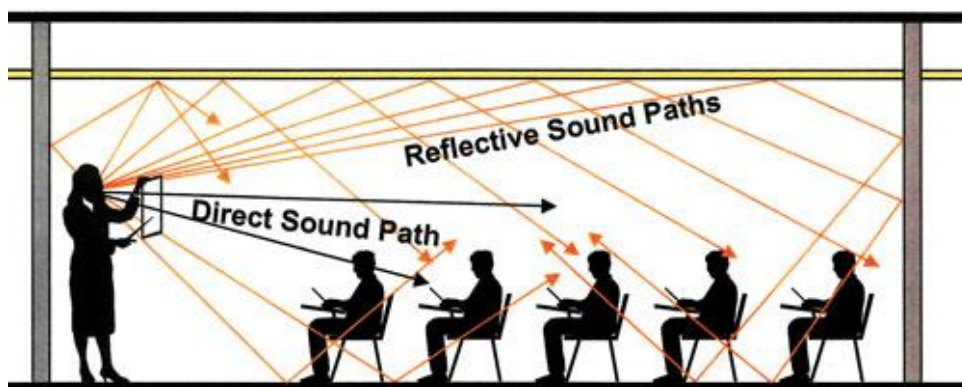
Razpon glasnosti, ki ga ljudje zaznamo je od 0 dB do 120 dB. Pri tem nam spodnja meja predstavlja slušni prag, zgornja meja pa predstavlja prag bolečine. Slušni prag je močno odvisen tudi od frekvence tona (slika 2.2) [7]. Tako more biti glasnost pri tonih z nizko frekvenco večja, kot glasnost pri resonančnih frekvencah ušesa (približno 3 kHz).



Slika 2.2: Graf minimalne glasnosti zvoka, ki je potrebna da človek zazna ton pri določeni frekvenci [5]

3 AKUSTIČNI ODMEV

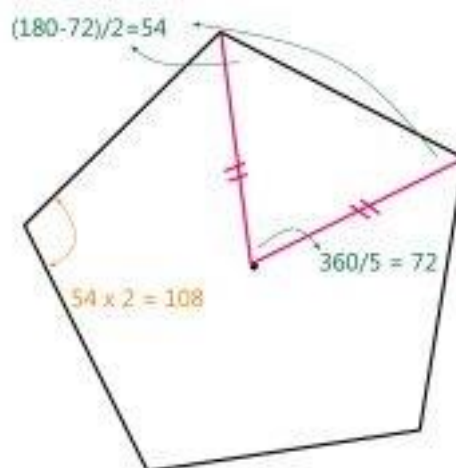
Če imamo v zaprtem prostoru vir zvoka, je odmev vztrajanje zvoka v prostoru po odklopu tega vira [9]. Ob priključitvi vira zvoka, začne na mestu poslušalca zračni tlak rasti eksponentno. To fazo imenujemo predzvok. Nato se vrednost zračnega tlaka ustali, postane konstantna. V tej fazi se zvok že odbija od mejnih površin (strop, tla, stene) in prihaja do odmeva. Po odklopu vira pa se zvok še naprej odbija od mejnih površin in prihaja do poslušalca, dokler se ne pretvori vsa energija valovanja [14]. Pri direktnem zvoku, to je zvok, ki prihaja od vira do poslušalca direktno, brez odbojev in ni odvisen ob oblike prostora, se glasnost za vsako podvojitvev razdalje zmanjša za 6 dB. Pri odbitem zvoku, to je zvok, ki do poslušalca prihaja po enem ali več odbojih od površin prostora (slika 3.1), se energija še dodatno zmanjšuje pri odbojih, širjenju zvočne energije po mejnih površinah in absorpciji v zraku, ko se spreminja v toplotno energijo. Odmev je zato vedno oslabljen različica vira. Ker je odmev moral prepotovati določeno razdaljo, preden se je od stene odbil in prišel nazaj do poslušalca, je odmev tudi vedno zakasnen. Ta lastnost odmeva, zakasnitev, je najpomembnejša lastnost pri vplivu na kakovost in razumljivost govora [11].



Slika 3.1: Prikaz direktnega zvoka in odmeva [11]

3.1 Vpliv oblike prostora na akustični odmev

Na akustično sliko prostora zelo močno vpliva tudi oblika prostora, njena prostornina in notranje strukture. Najslabša oblika prostora za odmev, je krogelna (sferična) oblika prostora. Ker so poti od izvora zvoka do sten zelo kratke, vrednost zvočnega tlak upade le deloma preden se odbije. Zaradi tega se zvok od sten odbija tudi večkrat in nastajajo dolgi odmevi. Če pogledamo realne oblike prostora, ki se uporabljajo v današnjem času (krogelne oblike prostora so redke) ima najslabšo akustiko prostora kocka [12]. Problem je v isti oddaljenosti in paralelnosti sten, kar povzroča dolge odmeve. Najpogostejša oblika prostora je prostor z pravokotnikom kot tlorisom prostora (paralelopipedna oblika prostora). Takšne oblike imajo tipične sobe v stanovanjskih hišah. Akustični odmev v takšnih prostorih je še vedno prisoten zaradi paralelnosti sten, vendar je zmanjšan zaradi različnih dimenzij prostora. Pomembno je razmerje dolžine, širine in višine prostora. Pri tem imajo določena razmerja ugodnejši akustični vpliv na prostor. Najboljše oblike prostorov za čim manjši akustični odmev so tiste, ki nimajo paralelnih sten. Tako bi bil odmev v sobi s tlorisom trikotnika močno zmanjšan, pojavil bi se lahko samo med tlemi in stropom. Ostale ugodne oblike prostorov, ki imajo majhen akustičen odmev zajemajo prostore s tlorisom pentagona, kjer ni paralelnih sten, hkrati pa lahko dosežemo veliko izkoriščenost prostora (slika 3.2).



Slika 3.2: Tloris prostora, pentagon. Na sliki je lepo vidno, da takšen prostor nima paralelnih sten, kar ugodno vpliva na manjši akustični odmev. [27]

3.2 Izračun odmeva v danem prostoru

Enačbo za izračun odmeva v prostoru imenujemo Sabinova enačba in omogoča izračun odmeva prostora, če poznamo njegovo prostornino, površino in povprečni koeficient absorpcije, kot to definira enačba (3.1) [13]. Formula ne upošteva oblike prostora in izgub moči zvoka v zraku.

$$RT_{60} = \frac{24 \ln(10) V}{c_{20} S a} \quad (3.1)$$

Pri tem je:

RT_{60} – čas odmeva (sec),

c_{20} – hitrost zvoka pri 20 °C (m/s),

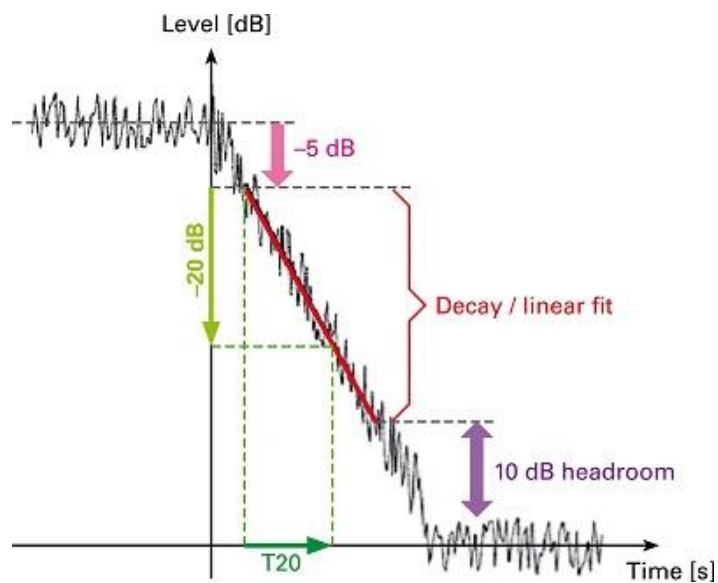
V – prostornina prostora (m^3),

S – površina prostora (m^2) in

a – povprečni absorpcijski koeficient celotne površine prostora.

Zmnožek površine prostora in povprečnega absorpcijskega koeficienta podaja skupno absorpcijo v enoti sabine. Koeficient absorpcije predstavlja absorpcijo zvoka v prostoru in lahko zavzema vrednosti od 0 do 1. Tako vrednost 0 pomeni, da se v prostoru ne absorbira nič zvoka in vrednost 1, da se absorbira zvok v 100 procentih. Formula temelji na predpostavki, da je akustični odmev prisoten v prostoru, dokler vrednost zvočnega tlaka (amplitude) ne pade na 1/1000 začetnega zvočnega tlaka, torej za 60 dB (slika 3.3) [10].

Iz enačbe (3.1) lahko vidimo vpliv prostora na čas odmeva. Ker se volumen prostora nahaja v števcu enačbe, bo z naraščanjem volumna prostora naraščal tudi čas odmeva. A hkrati se moramo zavedati, da z naraščanje volumna prostora raste tudi površina mejnih ploskev in s tem sama absorpcija zvoka. Zaradi tega čas odmeva ni povsem linearno odvisen od volumna prostora. Kadar računamo odmev prostora po dani enačbi, moramo vedeti, da izračun velja le za prazen prostor. V kolikor so v prostoru postavljeni predmeti in osebe se čas odmeva občutno zmanjša.



Slika 3.3: Prikaz padanja zvočnega tlaka v prostoru (merjenje časa akustičnega odmeva) [14]

3.3 Vpliv akustičnega odmeva na govor

V kolikor je čas odmeva kratek, odmev na razumevanje govora nima vpliva. Če pa je čas akustičnega odmeva daljši od 140 ms (torej, da uho zazna odmev 140 ms po direktnem zvoku), takšen odmev povzroči težje razumevanje govora. Zvok je težje razumljiv, ker se zlogi začnejo prekrivati in pride do pojava maskiranja besed.

4 ODSTRANJEVANJE AKUSTIČNEGA ODMEVA

4.1 Pasivno odstranjevanje akustičnega odmeva

V večini primerov želimo akustični odmev zatreti že preden se pojavi. V ta namen potrebujemo določene strukture, ki zvočno energijo absorbirajo namesto da jo odbijejo nazaj v prostor. Takšne strukture imenujemo absorberji. V hišnih prostorih deluje, veliko sobne opreme, vsake posebej, kot absorber. Tako so na primer zavese eden izmed absorberjev. Posledica tega je, da je akustični odmev veliko manjši v polno opremljenih prostorih, kot v popolnoma praznih prostorih. Iz tega je razvidno, da v takšne prostore dodatno ne rabimo nameščati namenskih absorpcijskih struktur. Problem se pojavi, v prostorih z večjo prostornino in posebno namembnostjo. Tako je akustični odmev v prazni športni dvorani že močno zaznaven. Zaradi tega se tam nameščajo (ponavadi na stene, lahko tudi na strop) posebni elementi za zmanjševanje odmeva.

4.1.1 Absorberji

Osnovni princip absorberjev je ta, da pri prehodu zvočne energije skozi različne snovi pride do delne absorpcije te energije. Kolikšen delež zvočne energije se bo pretvoril v notranjo energijo in kolikšen ohranil je odvisno od tipa materiala. Če pogledamo različne materiale, opazimo, da imajo različen vpliv na absorpcijo zvočne energije. Tako recimo steklo in nekateri lesi absorbirajo nizko frekvenčne zvoke, medtem ko beton zvočne energije ne absorbira, temveč jo skoraj v celoti odbije [15].

Ta lastnost, koliko zvočne energije se absorbira, je izražena z absorpcijskim koeficientom [18]. Koeficient absorpcije je določen z razmerjem absorbirane zvočne energije in zvočne energije, ki zadane material. Tako ima koeficient vedno vrednost med 0 in 1, pri čemer vrednost 0 pomeni, da material ne absorbira zvoka in vrednost 1, da material popolnoma absorbira zvočno energijo. Za primerjavo, akustični paneli, ki so namensko narejeni za zmanjševanje akustičnega odmeva imajo koeficient absorpcije 0.8 – 0.9, kar pomeni 80 do 90 % absorpcijo [16], medtem ko ima beton koeficient absorpcije med 0.01 – 0.02.

Absorpcija v prostoru je tako pogojena s koeficientom absorpcije materialov, ki so prisotni v prostoru, in posledično tudi s površino, ki jo ti materiali v prostoru zavzemajo, kot je prikazano z enačbo (4.1) [15]. Večja površina bo pomenila več možnosti za zvok da se absorbira in posledično manjši akustični odmev.

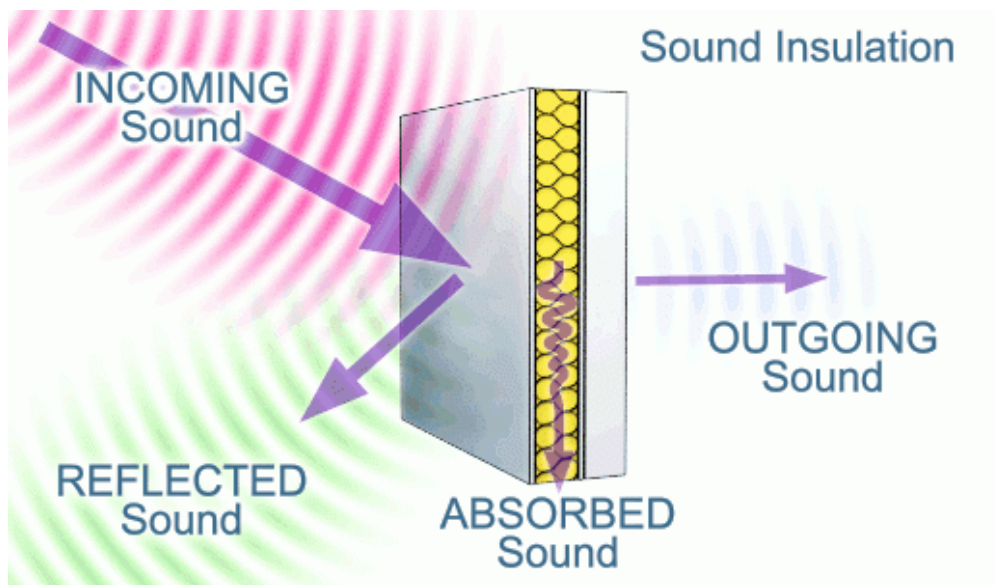
$$S_a = S \alpha \quad (4.1)$$

Pri tem je:

S_a – absorpcija (sabins),

S – površina absorpcijskega materiala v prostoru (m^2) in

α – koeficient absorpcije.



Slika 4.1: Prikaz odboja, absorpcije in prehoda zvoka. Absorpcijski materiali imajo visok koeficient absorpcije, posledično se veliko zvočne energije absorbira, to je spremeni v notranjo energijo. [17]

Sam koeficient absorpcije se za dan material spreminja s spreminjanjem frekvence zvočnega valovanja (tabela 1), prav tako je odvisen od vpadnega kota zvočnih valov na steno. S spreminjanjem položaja vira zvoka v prostoru se spreminja vpadni kot zvočne energije na absorber in posledično se lahko kljub enaki moči dveh zvočnikov absorbira različna količina zvoka. Posledica tega je različna jakost odmeva, pri različnih vpadnih kotih (slika 4.1). Če pogledamo frekvenčno odvisnost koeficienta absorpcije, vidimo da so nekateri materiali primernejši za absorbiranje nižjih frekvenc, spet drugi srednjih in višjih frekvenc [31]. V kolikor v prostor v katerem nas zanima absorpcija postavimo še ljudi, opazimo, da imajo ljudje visok koeficient absorpcije [32]. To dejstvo moramo upoštevati pri načrtovanju večjih prostorov, kot so na primer koncertne dvorane, kjer je odmev praznega prostora dolg, ob polni dvorani ljudi pa se močno zmanjša. V naslednji tabeli so prikazani koeficienti absorpcije za pogosto uporabljene materiale, pri različnih frekvencah zvočnega valovanja.

Tabela 1: Odvisnost koeficienta absorpcije različnih materialov od frekvence [15]

Frekvenca [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Beton	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04
Mavčne plošče	0,2	0,15	0,10	0,08	0,05	0,05
Okna (steklo)	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Lesena tla	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
Preproga (na betonski podlagi)	0,02	0,06	0,14	0,37	0,60	0,65
Steklena volna (1 cm debela na trdi podlagi)	0,45	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0

4.1.2 Porozni absorberji

V praksi uporabljamo različne vrste absorberjev. Med najpogostejše spadajo porozni absorberji. Porozni absorberji imajo obliko odprtocelične pene, znotraj katere se zvočna

energija pretvarja v notranjo energijo materiala. Med tipične predstavnike poroznih materialov spadajo mineralna, steklena volna, ter različni penasti materiali [16]. V kolikor porozne absorberje uporabljamo namensko za zmanjševanje akustičnega odmeva, so ti oblikovno narejeni tako, da porabijo še dodatno zvočno energijo (slika 4.2).



Slika 4.2: Primer panela poroznega absorberja umetne mase, ki se uporablja v prostorih za zmanjševanje akustičnega odmeva [28]

Količina zvočne energije, ki se bo absorbirala je odvisna od različnih dejavnikov materiala in zvoka. Največji vpliv na absorpcijo ima frekvenca zvoka. Porozni materiali so dobri pretvorniki zvočne energije v notranjo energijo materiala (toploto) pri srednjih in visokih frekvencah (slika 4.3) [18]. Pri nižjih frekvencah se odnesejo slabše. V teoriji bi se lahko uporabljali tudi za odstranjevanje nizkofrekvenčnega zvoka, toda za to bi potrebovali zelo debele porozne panele, ali pa bi jih morali nameščati odmaknjene od sten (tako zvišamo koeficient absorpcije) [19], kar pa vedno ni izvedljivo. Močan vpliv na absorbiranje ima tudi debelina materiala. Večja kot je debelina materiala, večji je razpon frekvenc v katerem je porozni material učinkovit [19].

Porozni materiali so najbolj učinkoviti, če so postavljeni na četrtni valovne dolžine frekvence zvočnega valovanja od trdne stene, ali pa so na steno pritrjeni in imajo debelino enako četrtni valovne dolžine [33]. Če imamo porozni material pritrjen na steno, bi za

zvok z frekvenco 2000 Hz potrebovali material debeline 4,3 cm, kot je prikazano v enačbi (4.2).

$$\Lambda = \frac{c}{v} \Lambda = \frac{343 \frac{m}{s}}{2000 \frac{1}{s}} \Lambda = 0.172m \frac{\Lambda}{4} = 0.043m = 4.3cm \quad (4.2)$$

Pri tem je:

λ – valovna dolžina [m],

c – hitrost zvoka v zraku pri sobni temperaturi [m/s] in

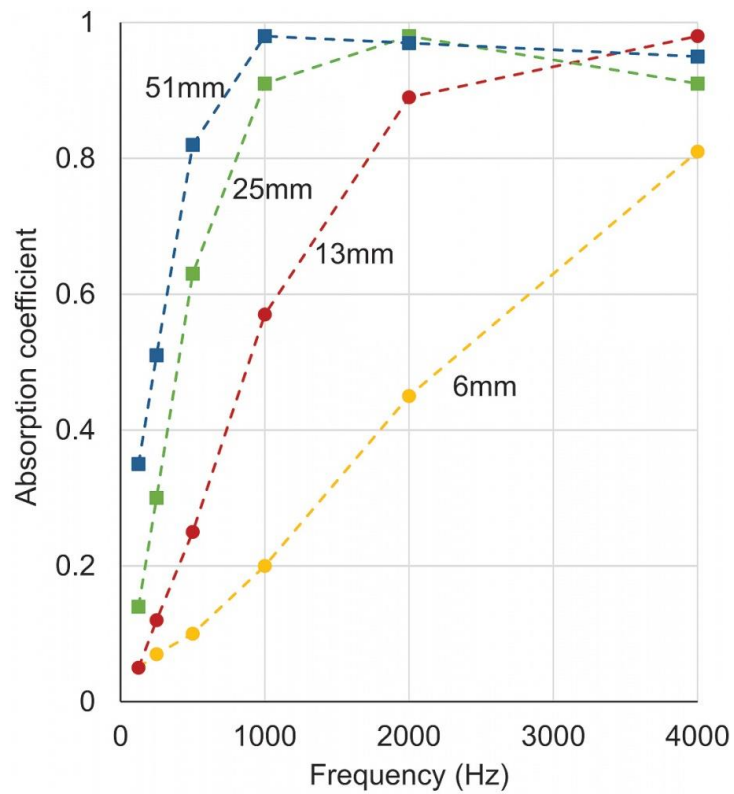
v – frekvenca zvočnega valovanja [Hz].

Iz tega vidimo, da za najboljšo absorbiranje zvočnega valovanja s frekvenco 2000 Hz, potrebujemo najmanj 4,3 cm debelo plast poroznega materiala. Isto enačbo lahko uporabimo za izračun debeline plasti, pri nižjih frekvencah, prikazano v (4.3). Za primer vzemimo 50 Hz.

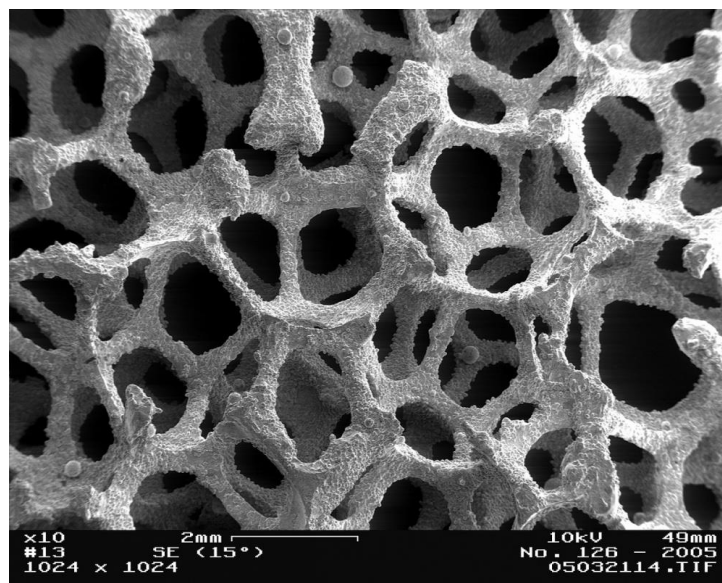
$$\Lambda = \frac{c}{v} \Lambda = \frac{343 \frac{m}{s}}{50 \frac{1}{s}} \Lambda = 6.86m \frac{\Lambda}{4} = 1.715m = 171.5cm \quad (4.3)$$

Vidimo lahko, da potrebujemo za odstranjevanje akustičnega odmeva pri frekvenci 50 Hz, plast poroznega materiala debelo kar 1,715 metra. To pa je v praksi neizvedljivo. Zaradi tega, se za odstranjevanje akustičnega odmeva nizkih frekvenc uporabljajo drugačni absorberji. V obeh zgornjih primerih, je bil izračun narejen v primeru, da imamo zvočno izolacijo pritrjeno na steno. Izolacijo lahko namestimo tudi tako, da je od stene odmaknjena za določeno razdaljo. S tem povečamo absorpcijo frekvence, ki ima valovno dolžino enako štiri kratniku oddaljenosti od stene.

Kot smo zapisali, se za odstranjevanje odmeva uporabljajo različni porozni materiali. Razlika je v njihovem koeficientu absorbiranja, ki je posledica različnih celičnih velikosti in posledično razmerja med volumnom zraka v porah in skupnemu volumnu. Za visoko absorbiranje zvočne energije je zaželena celična struktura z visokim deležem zraka proti celotnemu volumnu materiala (slika 4.4) [19]. To razmerje naj bo večje od 95 %.



Slika 4.3: Odvisnost koeficienta absorpcije poroznih materialov, od frekvence zvočnega valovanja in debeline materiala. Vidimo lahko da je absorpcija boljša pri srednjih in visokih frekvencah, ter debelejšem materialu. [19]



Slika 4.4: Notranja struktura poroznega absorpcijskega materiala. Na sliki je lepo vidno veliko praznega prostora, ki je potreben za učinkovito absorbiranje zvočne energije. [20]

Končna količina absorpcije določenega poroznega materiala je torej odvisna od:

- frekvence zvočnega valovanja,
- celične velikosti (poroznosti),
- debeline materiala in
- gostote materiala.

4.1.3 Membranski absorberji

Omenili smo, da so porozni materiali učinkoviti v odstranjevanju akustičnega odmeva srednjih in visokih frekvenc. V teoriji bi lahko uporabili tudi za odstranjevanje nizko frekvenčnega valovanja, vendar v praksi težko postavljamo material na veliko oddaljenost od stene, ali postavljamo debele panele. V tem primeru, moramo uporabiti drugačen pristop.

Membranski absorberji so narejeni iz membrane (platno, steklo, tanek les, ...), pritrjene na ustreznemu nosilec, ki ob prisotnosti zvočnega valovanja niha in pretvarja zvočno energijo v mehansko energijo [16]. So zelo ozkopasovni absorberji in se uporabljajo za odstranjevanje nizkofrekvenčnega zvočnega valovanja pod 1000 Hz (slika 4.5). Najbolj učinkoviti so pri resonančni frekvenci nihanja, pri kateri se porabi največ zvočne energije enačba (4.4). Ponavadi imajo nižje koeficiente absorpcije kot porozni materiali.

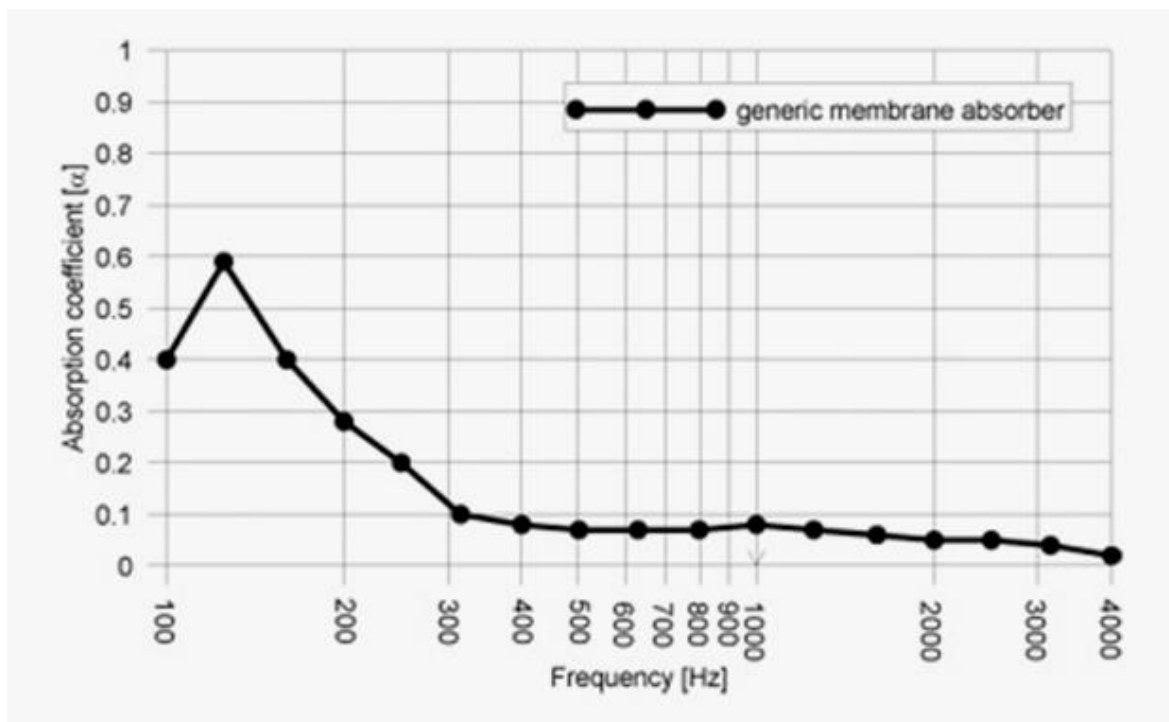
$$f_r = 600 \times \sqrt{\frac{1}{M \times d}} \quad (4.4)$$

Pri tem je:

f_r – resonančna frekvenca (Hz),

M – masa membrane na kvadratni meter (kg/m^2) in

d – debelina zračne reže med membrano in steno (cm) .



Slika 4.5 Graf koeficienta absorpcije membranskega absorberja v odvisnosti od frekvence. Na sliki je vidna ozkopasovna absorpcija zvočne energije. [29]

V praksi lahko v posameznih prostorih najdemo membranske absorberje, čeprav to ni njihov prvotni namen. Tako so na primer vrata in okna membranski absorber, čeprav z majhnim koeficientom absorpcije. Koeficient vrat se v govornem frekvenčnem območju giblje med 0.15 do 0.30, kar pomeni do 30 % absorpcije zvočne energije (koeficient je odvisen tudi od materiala vrat) [34]. To ni veliko, vendar moramo upoštevati, da so površine, ki jih vrata in okna zavzemajo ponavadi velika. Skupna absorpcija zato ni zanemarljiva.

V kolikor hočemo povečati učinkovitost membranskega absorberja, lahko takoj za njim namestimo porozni material. Na ta način dvignemo koeficient absorpcije in s tem povečamo količino absorbirane zvočne energije.

4.1.4 Resonatorji

Resonatorji so votla telesa različnih oblik, ponavadi z ozkim grlom in določeno prostornino. Resonatorje z ozkim grlom imenujemo tudi Helmholtzovi resonatorji. Največjo absorpcijo imajo pri resonančni frekvenci - enačba (4.5).

$$f_r = (c/2\pi) \times \sqrt{\frac{S}{l+1.57R}} \times V \quad (4.5)$$

Pri tem je:

f_r – resonančna frekvenca (Hz),

c – hitrost zvoka pri sobni temperaturi (m/s),

S – presek grla (m^2),

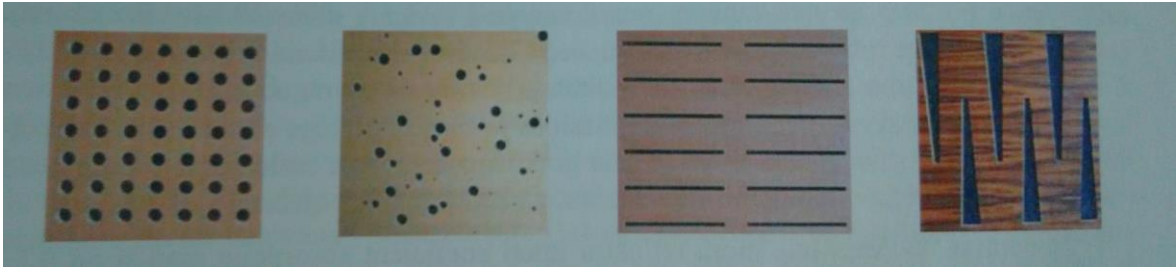
l – dolžina grla (m),

R – polmer (m) in

V – volumen resonatorja (m^3).

Tipično so resonatorje uporabljali v cerkvah, kjer so jih namestili v stene. Vanje so dodali pepel, ki je deloval kot absorpcijski material in s tem razširil frekvenčno območje absorpcije. Resonatorji sami, kot absorberji, se uporabljajo redko, saj je frekvenčno območje absorpcije zelo ozko [16]. Pogosto se uporablja skupek resonančnih absorberjev (različnih oblik), vsak s svojo resonančno frekvenco, ki zagotavlja absorpcijo v širšem frekvenčnem spektru. Na tak način lahko zadušimo akustični odmev nizkih frekvenc.

Danes se resonatorji uporabljajo v kombinaciji z dodatnim poroznim materialom. Ponavadi se namestijo akustični paneli (to so plošče različnih materialov, les, mavčne plošče), kateri imajo izvrtane luknje. Te luknje so lahko različnih oblik in dimenzij, ter služijo kot resonator (slika 4.6). Če ploščo uporabimo takšno, brez dodatnega absorpcijskega materiala imamo zelo selektivno zmanjševanje akustičnega odmeva, pri ozkem frekvenčnem območju. Med steno in akustičnimi paneli pa lahko dodamo porozni material, na primer mineralno volno, ki razširi frekvenčno območje absorpcije.



Slika 4.6: Helmholtzovi resonatorji. Na sliki so vidne različne oblike odprtin, ki služijo za absorpcijo različnih frekvenc in imajo tudi estetski značaj. [30]

4.2 Aktivno odstranjevanje akustičnega odmeva

Pasivno odstranjevanje odmeva je učinkovit način zmanjševanja odmeva v prostoru, vendar ima svoje omejitve. Ponavadi moramo akustične panele načrtovati že pri gradnji prostora, prav tako so takšni paneli cenovno dragi. Najpogosteje se uporabijo v večjih prostorih, v katerih imamo malo objektov ki bi zvok absorbirali sami po sebi (športne dvorane).

Vzemimo za primer sobo, v kateri uporabljamo mikrofon. To je lahko predavalnica, v kateri profesor govori v mikrofon, da tudi študentje v zadnjih vrstah nazorno slišijo predavano snov, lahko je konferenčna soba, v kateri imamo prostoročni telefon preko katerega se pogovarjamo z neko drugo osebo. Če ima takšna soba slabo akustiko, v našem primeru da se v sobi pojavlja odmev, bo to zelo negativno vplivalo na govor, ki se prenaša preko mikrofona do sprejemnika. Mikrofon bo v tem primeru namreč prvo zajel direkten zvok govora, nato pa bo z zamikom zajel še odbit zvok od sten, torej odmev. V kolikor je ta čas zakasnitve velik, bo zvok, ki ga sprejemnik sliši nerazločen.

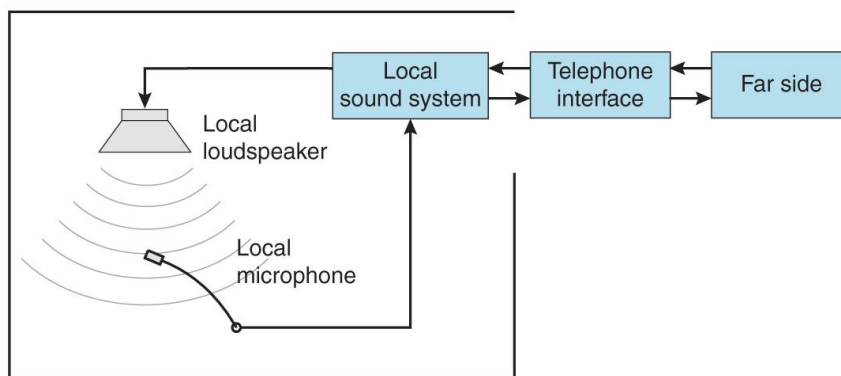
Ta problem lahko do neke mere rešimo z nameščanjem pasivnih absorberjev, ki bi izboljšali akustiko prostora. Vendar to v vseh primerih ni mogoče, prav tako moramo upoštevati, da so takšni akustični paneli draga naložba. V takšnih primerih se lahko na strani govornika uporabljajo aktivni odstranjevalci akustičnega odmeva. To so prilegajoči se algoritmi, ki se izvajajo med zajemom govora. V kolikor zaznajo prisotnost odmeva, ga iz govora odstranijo. Na ta način odstranimo odmev, ki bi se drugače predvajal po

zvočnikih, še vedno pa ostane odmev sobe. Ti algoritmi se ponavadi izvajajo na digitalnih signalnih procesorjih.

4.2.1 Problem konferenčnih sob s telefonijo preko internetnega protokola (Voice over Internet Protocol - VoIP)

Podoben problem se pojavi, ko imamo dve osebi (oseba A in oseba B), ki se obe pogovarjata preko interneta s pomočjo video konference ali prostoročnih telefonov. Zvok se pri obeh osebah zajema preko mikrofona, pošlje do sprejemnika, kjer se predvaja na zvočniku (slika 4.7).

Problem nastane zaradi odmeva, ki nastane pri takšnem načinu pogovarjanja. Ko se osebi B predvaja govor osebe A, se hkrati pri osebi B ta govor zajema z mikrofonom in pošilja ter predvaja nazaj osebi A. Tako oseba A sliši svoj zakasnen govor. Hkrati se ta zvok, v kolikor še ima dovolj akustične energije ponovno zajame na strani govorca A in predvaja pri osebi B. Tako nastane zanka, ki vnaša v govor akustični odmev. Zakasnitev govora nastane predvsem pri pošiljanju govora in v kolikor je velika, negativno vpliva na razumljivost govora.

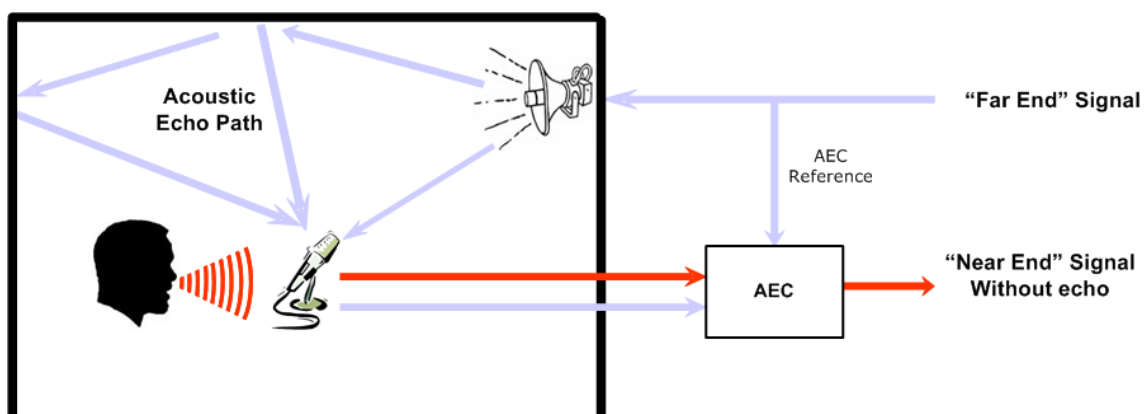


Slika 4.7: Vizualizacija konferenčne sobe. »Far side« predstavlja govorce B, do katerega se prenese govor govorca A. Tam se predvaja, ponovno zajame in pošlje nazaj govorce A. Nastala je zanka, ki v govor vnaša akustični odmev. [21]

4.2.2 Rešitev za konferenčne sobe

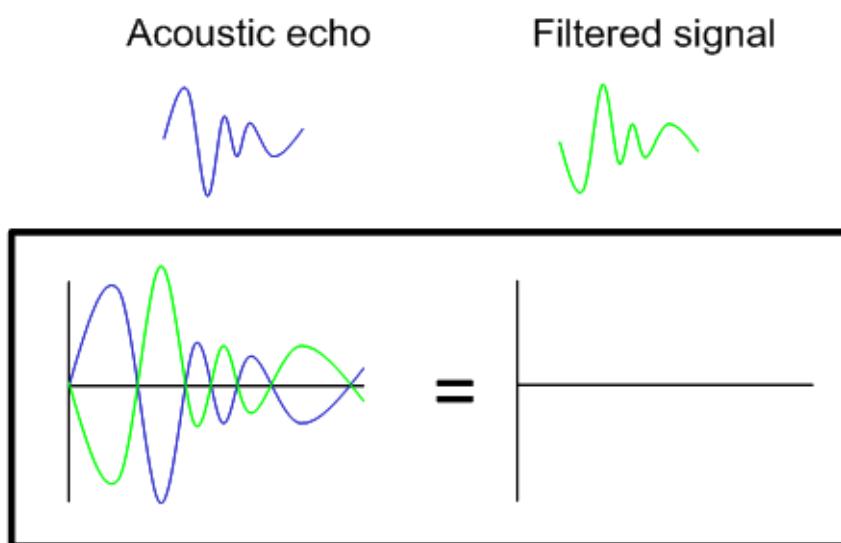
Ena izmed prvih rešitev je bila v "half-duplex" načinu pogovora. To pomeni, da ko oseba A govori se osebi B predvaja sprejet govor, vendar se osebi B hkrati izklopi mikrofona [22]. Tako se govor osebe A ne more ponovno zajeti na strani osebe B in s tem se prepreči akustični odmev. Problem pri takšnem načinu pogovora je, da nimamo prave dvosmerne komunikacije. Ko ena oseba govori, lahko druga oseba samo posluša in ne more posegati v pogovor. Oseba B mora v tem primeru počakati, da oseba A preneha z govorom in šele nato lahko odgovori. Še večje težave se pojavijo pri pogovorih, v katerih je udeleženi več oseb. Tam en govorec iz pogovora izključil vse ostale, kar je nesprejemljivo.

Boljša rešitev je v uporabi algoritmov za odstranjevanja akustičnega odmeva (acoustic echo cancellation - AEC). To so programski algoritmi, ki se izvajajo na digitalnem signalnem procesorju. Takšni procesorji morajo biti nameščeni v verigo procesiranja za zajemom govora, kjer sproti odstranjujejo akustični odmev. Da algoritmi vedo, kaj morajo iz govora odstraniti, jim moramo poslati referenco sprejetega govora. Mikrofon nato zajame naš govor in odmev drugega govornika, ter pošlje kombinacijo obeh govorov v algoritem AEC. Algoritem AEC primerja referenco sprejetega govora z izhodnim govorom, ter odstrani enake dele (slika 4.8).



Slika 4.8: »Far end« signal nam predstavlja daljni, sprejet govor. Ta govor se pošlje kot referenca AEC algoritmu. S tem algoritmu definiramo kaj mora iz zajetega govora odstraniti. [24]

Algoritem odstrani odmev s pomočjo prilagajočih se digitalnih filtrov. Algoritem konstantno dobiva referenco sprejetega govora in glede na ta signal izračuna ustrezne uteži digitalnega filtra. Digitalni filter ustvari obraten signal od reference, ter ga prišteje zajetemu govoru iz mikrofona (slika 4.9).



Slika 4.9: Ustvarjanje obratnega signala s pomočjo digitalnega filtra. Seštevek reference in obratnega signala je končni rezultat algoritma. [24]

V kolikor se v konferenčni sobi nahaja več mikrofонов, mora vsak mikrofona imeti svoj signalni procesor z algoritmom AEC. To je posledica akustike prostora, potovanja sprejetega zvoka po prostoru in odbijanja od sten, kar povzroči različne jakosti in zamike zvoka na različnih lokacijah v prostoru. Pomembno je, da mikrofona namestimo kar se da blizu govorcem in poskrbimo za ustrezne razdalje med mikrofoni tako, da zajemajo čim manj prostorskega šuma.

4.2.3 Težave algoritmov AEC

Prva najočitnejša težava se pojavi zaradi razlike med referenco, ki jo algoritem sprejme in dejanskim ponovno zajetim govorom [24]. Algoritem AEC sprejme referenco govora osebe B, preden se dejanski sprejet zvok predvaja osebi A. Pred predvajanjem govora

osebi A, se ta ojači skozi zvočnike, po predvajanju pa se širi po prostoru, kjer naleti na ovire, ki pomenijo dušenje zvoka ali pa njegovo odbijanje. Vse to vpliva na signal in ga preoblikuje. Posledica tega je, da signal ponovno zajetega govora, ni enak referenci, mu je pa podoben. Signal je preoblikovan in skaliran.

Algoritem AEC, mora prepoznati in odstraniti ne samo direkten zvok, ki prihaja iz zvočnika, temveč tudi ta isti zvok v obliki odmeva sobe. To samo po sebi ni težava, poveča pa kompleksnost samega algoritma.

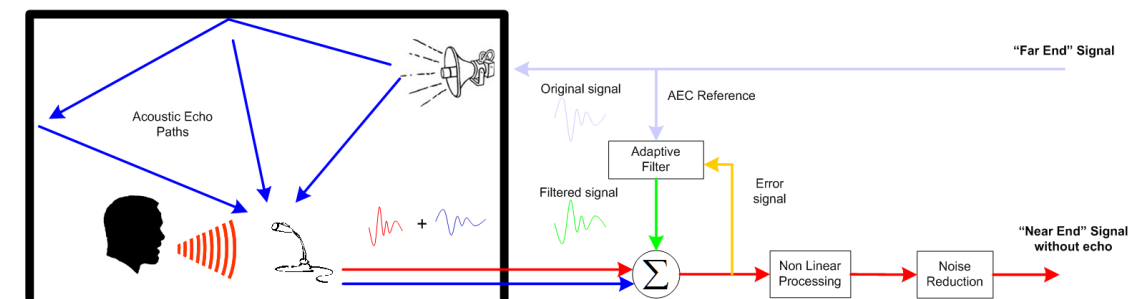
Tudi akustika prostora se lahko spreminja s časom. Algoritem mora biti prilagodljiv tudi na te spremembe. V prostoru se lahko premikajo mikrofoni, prav tako v sobo prihajajo in odhajajo ljudje, odpirajo se vrata in okna. Vse to spreminja akustiko prostora in posledično se mora algoritem AEC hitro odzivati na dane spremembe v prostoru s spreminjanjem uteži filtra. Algoritmi imajo ponavadi podano stopnjo konvergence, ki pove, kako hitro se algoritem lahko odzove na spremembe v prostoru s spreminjanjem parametrov filtrov. Če algoritem ni zmožen spremeniti parametrov v ustreznem času govorimo o izgubi konvergence, kar pomeni da bo sogovornik slišal svoj odmev.

Vsi algoritmi imajo tudi omejitev maksimalne zakasnitve odmeva, ki ga lahko iz govora odstranijo.

4.2.4 Celoten proces odstranjevanja odmeva

- Sprejet zvok se uporabi kot referenca in se pošlje algoritmu AEC, kjer se bo uporabil za primerjavo sprejetega in odhodnega zvoka, ter posledično za odstranjevanje odmeva,
- Glede na sprejet zvok, algoritem s procesom konvergence spremeni parametre filtra,
- Sprejet zvok se ojači skozi zvočnike in predvaja v prostor,
- Mikrofon zajame govor govoreče osebe, zvok iz zvočnikov in odboj zvoka iz zvočnikov,

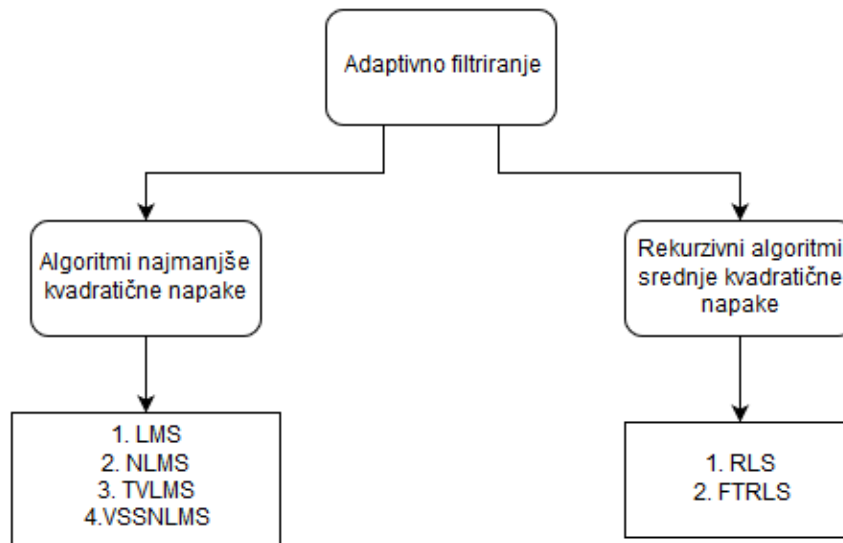
- Zajet zvok se pošilja algoritmu AEC, kjer se s pomočjo reference odstrani ponovno zajet zvok zvočnikov (odstranimo odmev),
- Izračunamo napako pri odstranjevanju signala in jo posredujemo algoritmu, kjer ponovno popravimo parametre filtra (slika 4.10),
- Preostali odmev gre skozi nelinearno procesiranje, kar pomeni, da signal analiziramo v določenem časovnem okviru in nato uporabimo statistični model za ugotavljanje prvotne vrednosti signala (originalnega govora),
- Na koncu odstranimo še šum iz okolja, ki so ga zajeli mikrofoni.



Slika 4.10: Celoten proces odstranjevanja odmeva [24]

4.2.5 Primerjava različnih algoritmov

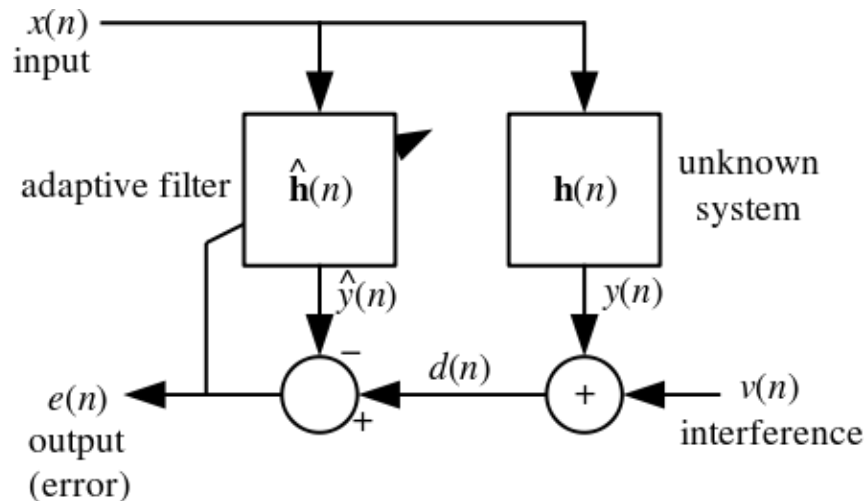
Algoritmi, ki se uporabljajo za odstranjevanje akustičnega odmeva spreminjajo uteži digitalnih filtrov in s tem spreminjajo prenosno funkcijo tako, da je ta enaka referenci algoritma [26]. Prilagodljive filtre potrebujemo ker so določeni parametri operacije neznani ali pa se s časom spreminjajo. Pri odstranjevanju akustičnega odmeva se spreminja zajeta referenca. Algoritme običajno izvajamo nad cenovno funkcijo, ki je kriterij optimalnega delovanja filtra in diktira kako se spreminjajo uteži filtrov. Z naraščanjem moči digitalnih signalnih procesorjev so adaptivni filtri vse bolj uporabni tudi v realnih okoljih in je zato tudi zmeraj več algoritmov, ki jih vključujejo. V grobem algoritme delimo na dve veji, na iterativne in rekurzivne (slika 4.11).



Slika 4.11: Algoritmi, ki spreminjajo koeficiente digitalnega filtra so lahko iterativni (leva veja) ali rekurzivni (desna veja)

4.2.5.1 Algoritem najmanjše kvadratične napake

Algoritem najmanjše kvadratične napake (least mean square - LMS) nastavlja parametre filtra tako, da je povprečna kvadratična napaka (signal napake, razlika med želeno in dejansko vrednostjo) najmanjša [26]. Koeficienti filtra se spreminjajo v vsakem koraku računanja kvadratične napake in so odvisni od trenutne vrednosti signalov. V primeru odstranjevanja odmeva, se nastavljajo parametri filtra tako, da je prenosna funkcija filtra enaka referenci signala, ki jo dobi algoritem (slika 4.12).



Slika 4.12: V našem primeru je vhod $x(n)$ enak referenci govora. Algoritem nastavlja parametra filtra tako, da je prenosna funkcija filtra ($\hat{h}(n)$) enaka prenosni funkciji reference ($h(n)$). Če signala odštejemo dobimo napako ($e(n)$), ki jo hočemo minimizirati. [25]

Algoritem začne z utežmi postavljenimi na 0 in jih v vsaki iteraciji spreminja tako, da ustrezajo gradientu kvadratične napake [36]. V kolikor je gradient kvadratične napake pozitiven, pomeni da bi signal napake v naslednjih iteracijah naraščal ob uporabi istih parametrov filtra (uteži) [36]. Posledično moramo uteži zmanjšati, kot je prikazano v enačbi (4.6). Isto velja v obratni smeri. V kolikor imamo negativno vrednost gradienta kvadratične napake, moramo vrednosti uteži povišati. Algoritem LMS teži k temu, da je vrednost signala napake čim manjša, saj se tako zagotovi najboljšo odstranjevanje odmeva.

$$w_{n+1} = w_n - \mu \Delta \varepsilon[n] \quad (4.6)$$

Pri tem je:

w_{n+1} = novo izračunana utež,

w_n = trenutna utež,

μ = velikost stopnice (konvergenčni koeficient) in

$\varepsilon[n]$ = povprečna kvadratična napaka.

Cenovna funkcija, ki jo minimiziramo s pomočjo algoritma LMS, je definirana z enačbo (4.7).

$$C(n) = E \left\{ \left| (e(n))^2 \right| \right\} \quad (4.7)$$

Pri tem je:

$C(n)$ = cenovna funkcija,

E = pričakovana vrednost in

$e(n)$ = napaka trenutnega vzorca.

Problem na katerega naleti algoritem LMS je ta, da lahko postane nestabilen in posledično izgubi konvergenco (to pomeni, da vrednosti uteži ne konvergirajo k želenim vrednostim uteži). To se zgodi, ko je vrednost spremembe uteži velika, ima veliko varianco, kar v realnosti predstavlja veliko vrednost stopnice [26]. Če imamo veliko vrednost stopnice to pomeni, da se bodo tudi vrednosti uteži spreminjale za velike vrednosti. Tako se lahko zgodi, da se vrednosti uteži spremenijo tako, da na primer negativni gradient postane pozitiven. V naslednji iteraciji pa se lahko zgodi, da se vrednosti uteži spremenijo tako, da je gradient znova negativen. Vidimo, da dobimo osciliranje okoli optimalnih vrednosti uteži, kar prinaša nestabilnost algoritma. Seveda lahko vedno izberemo manjšo vrednost stopnice, kar bi zagotovilo stabilnost, vendar pa bi se čas za iskanje ustreznih uteži povečal.

Problem lahko torej delno rešimo z ustrezno izbiro velikosti stopnice, kjer srednje velika vrednost stopnice pomeni hitrejšo konvergenco in manjšo stabilnost pri minimalnih vrednostih.

4.2.5.2 Algoritem normirane srednje kvadratične napake

Omenili smo, da je težava na katero naleti algoritem LMS nestabilnost zaradi velikega spreminjanja vhoda $x(n)$. Algoritem normirane srednje kvadratične napake (normalised

least mean square - NLMS), deluje na enakem principu kot algoritem LMS, torej, da teži k zagotavljanju čim manjšega signala napake, vendar pri tem uporablja normirano vrednost vhoda. Ker se vhod sedaj giblje med točeno določenimi vrednostmi, je zmanjšan vpliv velikosti stopnice (μ) in posledično izboljšana stabilnost algoritma.

4.2.5.3 Algoritem časovno spremenljive srednje kvadratične napake (time varying least mean square - TVLMS)

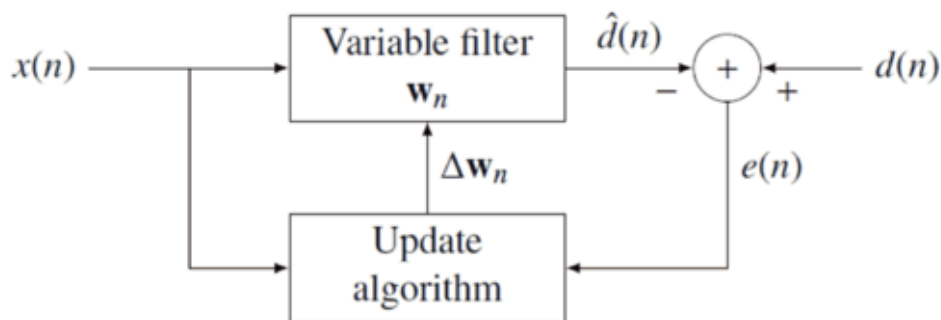
Pri tem algoritmu gre za izboljšano različico algoritma LMS. Od algoritma LMS se razlikuje v tem, da se konvergenca spreminja s časom. To dosežemo tako, da se časovno spreminja velikost stopnice. Algoritem TVLMS se je pokazal kot boljša izbira pred algoritmom LMS, saj ima hitrejšo konvergenco in povprečno manjši signal napake [36].

Algoritem LMS potrebuje ustrezno veliko velikost stopnice, za zagotavljanje dovolj hitre konvergenca. Hkrati to pomeni, da bo algoritem nestabilen pri minimalnih vrednostih in manj natančen. TVLMS to odpravlja tako, da ima veliko velikost stopnice v stopnji inicializacije (parametri algoritma so nastavljeni na neko privzeto vrednost, ponavadi na vrednost 0), kar pomeni veliko konvergenco [36]. To je na začetku zaželeno, saj potrebujemo hitro se spreminjajoče parametre filtra. S časoma se velikost stopnice zmanjša, konvergenca pade ter se zaradi tega posledično poveča stabilnost algoritma ter njegova natančnost (zmanjša se signal napake) [36].

4.2.5.4 Rekurzivni algoritem srednje kvadratične napake (recursive least square RLS)

Algoritem RLS išče uteži digitalnega filtra rekurzivno preko določene funkcije (slika 4.13). Tukaj je opazna največja razlika v primerjavi z algoritmom LMS in njegovimi izpeljavami. Vsi algoritmi LMS so težili k temu, da je bil signal napake čim manjši, medtem ko algoritem RLS preračunava drugačno cenovno funkcijo, katere ceno želimo minimizirati. Ta funkcija pa je odvisna od samega signala napake. V primerjavi z ostalimi algoritmi, algoritem RLS

izkazuje hitrejšo konvergenco, vendar pa ima večjo računsko zahtevnost. To je pomemben podatek v kolikor želimo algoritem realizirati na DSP-ju [36].



Slika 4.13: Diagram RLS filtra [23]

Algoritem RLS deluje na principu računanja funkcije C , to je cenovna funkcija, katere vrednost želimo minimizirati, kot to določa enačba (4.8). Odvisna je od signala napake, ta pa je odvisen od uteži filtra. Z spreminjanjem uteži filtra torej posredno vplivamo na spreminjanje cenovne funkcije. V funkciji je tudi faktor pozabljivosti, to je konstanta z vrednostjo med 0 in 1, ki po vsakem rekurzivnem klicu daje eksponentno manjšo veljavo starim členom signala napake [37]. Majhen faktor pozabljivosti pomeni, manjši vpliv starejših členov signala napake pri računanju cenovne funkcije. To pomeni, da je filter občutljivejši na novejšje zajete vrednosti signala napake, kar na koncu pomeni večjo spreminjanje uteži samega filtra. V praksi se uporabljamo faktor pozabljivosti med 0,98 in 1 [37].

$$C(w_n) = \sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} e^2(i) \quad (4.8)$$

Pri tem je:

$C(w_n)$ = cenovna funkcija,

n = trenutni vzorec,

λ = faktor pozabljivosti in

$e(i)$ = signal napake.

Minimalno vrednost cenovne funkcije dobimo z njenim odvajanjem in enačenjem z 0. Končna enačba za izračun uteži je definirana kot (4.9):

$$w_n = R_x^{-1}(n) r_{dx}(n) \quad (4.9)$$

Pri tem je:

w_n = utež filtra,

R_x = matrika kovariance (kovarianca pomeni povezanost med dvema spremenljivkama – v našem primeru med x in n , $x(n)$) in

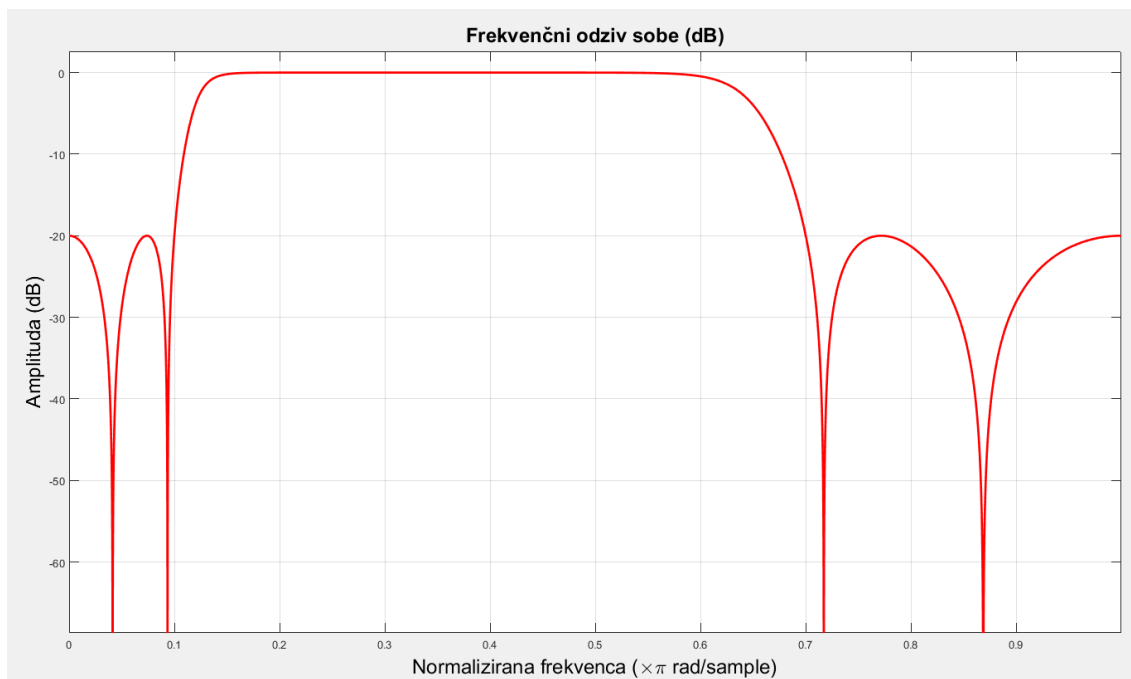
r_{dx} = matrika kovariance med signaloma $x(n)$ in $d(n)$.

5 PREIZKUŠANJE ALGORITMOV V OKOLJU MATLAB

Izbrane algoritme smo preizkusili v okolju MATLAB (matrix laboratory). Preverili smo učinkovitost LMS in rekurzivnih algoritmov, ter analizirali vpliv stopnice na filtriranje. Programsko okolje MATLAB ima že vgrajen pogovor preko VoIP in dostopamo lahko posebej do bližnjega in daljnega signala. Prvi v tem primeru predstavlja govorca A, drugi govorca B. Če oba signala združimo, dobimo celoten pogovor. Pri tem je daljnji signal brez vpliva sobe govorca A na ponovno zajeti signal, zato smo v programskem okolju definirali vpliv sobe (impulzni odziv), ter nato modificirali daljni signal, tako da nam ustrezno predstavlja ponovno zajet signal na strani osebe A. Naloga adaptivnih algoritmov je bila, da iz ponovno zajetega zvoka mikrofona odstrani daljnji signal, tako da se je naprej prenašal samo bližnji signal.

5.1.1 Postavitev okolja

Vpliv sobe pri govorcu A smo izvedli s pomočjo orodja za definiranje digitalnih filtrov [40]. Predstavlja vpliv poti na signal, ki potuje od zvočnika do mikrofona, kjer ga ponovno zajamemo. Ustvarili smo frekvenčni odziv sobe, ki je podoben takšnemu, ki bi ga izmerili v realnem svetu v konferenčni sobi (slika 5.1). Kaže kako se sistem (v našem primeru soba) obnaša, če vanjo postavimo vir zvoka, sinusni signal, pri različnih frekvencah [38]. Za filter smo uporabili pasovno prepustni filter, ter normirali njegovo frekvenčno območje [40]. Vpliv te frekvenčne karakteristike kasneje uporabimo za spreminjanje daljnega signala.



Slika 5.1: Frekvenčni odziv sobe pri govorniku A. S tem filtrom spreminjamo daljni signal, tako da ta ustrezno predstavlja ponovno zajet zvok iz zvočnikov, ki se je odbil od sten.

Območja z negativnimi decibeli (slika 5.1) predstavljajo območja dušenja in pomeni, da pri tej frekvenci signal izgublja moč. Vsakih 10 dB izgube amplitude predstavlja deljenje moči signala s faktorjem 10. To pomeni, da ima signal z vrednostjo -10 dB eno desetino prvotne moči, signal z -20 dB pa le še eno stotino moči prvotnega signala. Če prevedemo to v amplitudo signala to, pomeni da vsakih -20 dB pomeni zmanjšanje amplitude signala za faktor 10, kar podaja enačba (5.1).

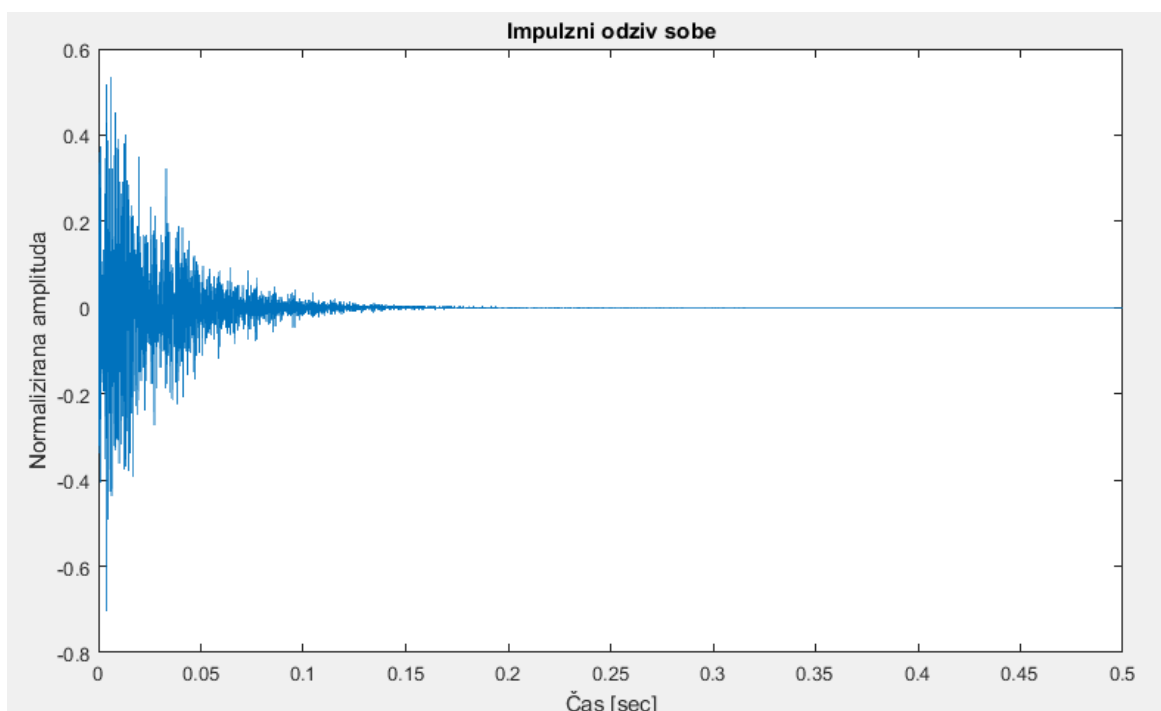
$$dB = 20 \log \left(\frac{A_2}{A_1} \right) \quad (5.1)$$

Območje, kjer ima filter amplitudo 0 dB, predstavlja območje, v katerem je vhodni signal nespremenjen - tam ima signal enako amplitudo in moč.

Ko imamo frekvenčno karakteristiko sobe, lahko iz nje pridobimo impulzni odziv. Impulzni odziv predstavlja odziv sistema (v našem primeru sobe) na Diracov impulz. Diracov impulz je signal s širino 0 in neskončno amplitudo. Ker v realnem svetu tak signal ne obstaja,

lahko v našem modelu uporabimo samo približke. Impulzni odziv je izhodni signal $h(t)$, ko je na vhodu impulz. Koristen pa je, ker omogoča izračun izhoda sistema za vsak možen vhod. To je mogoče z izračunom konvolucije vhodnega signala in impulznega odziva sistema [35].

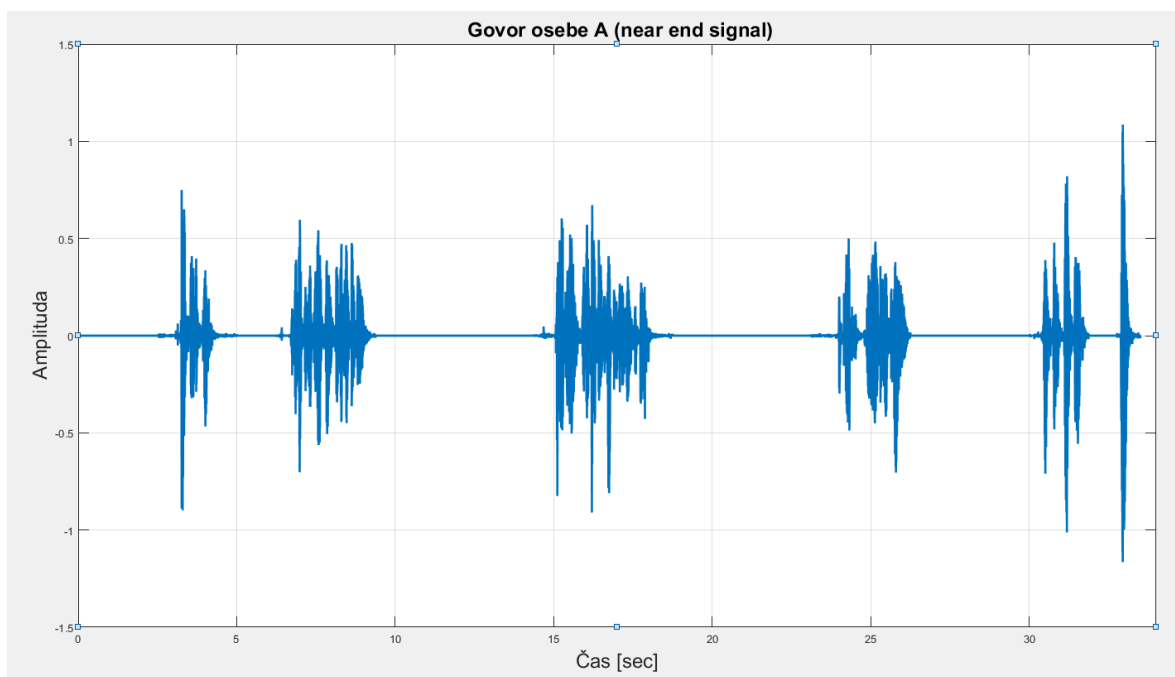
Za izris impulznega odziva smo uporabili nov klic funkcije step (slika 5.2). Kot vhodna parametra smo podali filter, ki smo ga zgradili in približek Diracovega impulza. Razlog, da smo to naredili ponovno in nismo impulznega odziva preverili kar v orodju za izrisovanje filtrov je, da je impulzni odziv v orodju za izrisovanje filtrov prikazan kot diskretno časovno zaporedje, medtem ko nas zanima impulzni odziv prikazan kot zvezna časovna funkcija.



Slika 5.2: Impulzni odziv sobe govorca A na Diracov impulz. Impulzni odziv nam, s pomočjo izračuna konvolucije vhodnega signala in impulznega odziva, omogoča izračun izhoda sistema za vsak možen vhod.

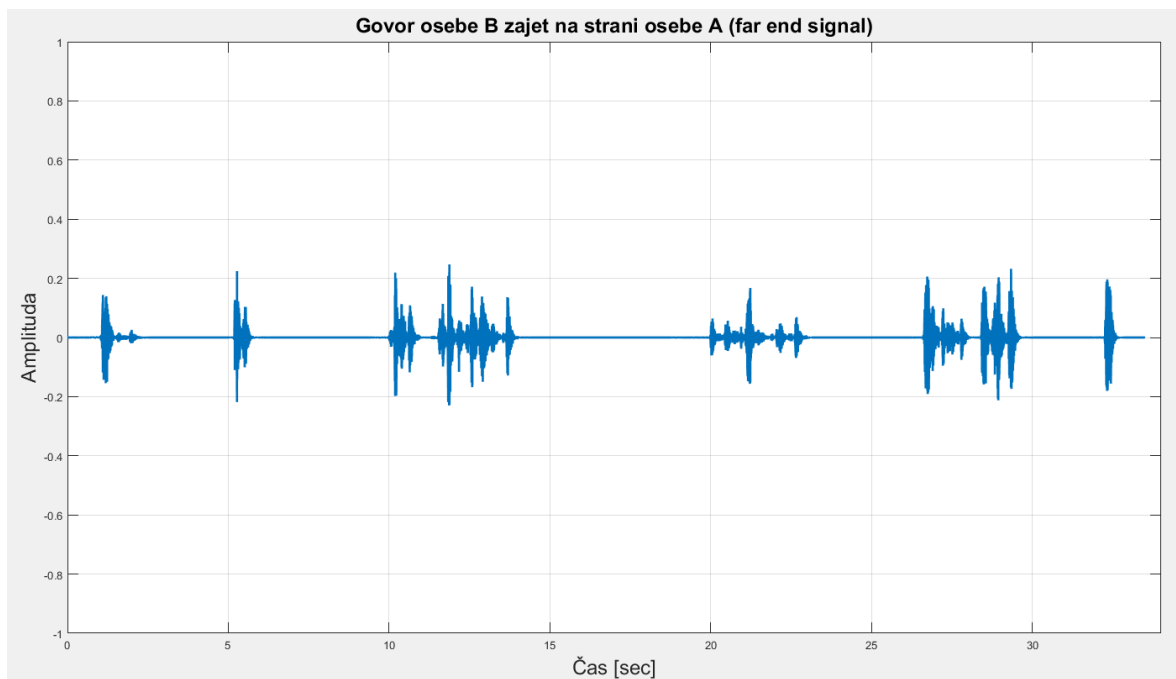
Kot smo omenili, ima programsko okolje MATLAB že vgrajen pogovor med dvema oseba preko tehnologije VoIP. Dostopamo lahko do posameznih govorov obeh govorcev posebej. Oba govora smo zato naložili, saj smo iz njih kasneje sestavili celoten

pogovor. Najprej smo naložili govor osebe A, ki predstavlja bližnji signal, ki je zajet v bližini mikrofona. To je zaželen signal, ki ga želimo prenesti, medtem ko se želimo znebiti daljnega signala, ki ga mikrofoni ponovno zajame na strani govorca A. Signal smo analizirali v časovni domeni, tako da ga lahko kasneje primerjamo s končnimi signali, ki so šli skozi različne filtre (slika 5.3).



Slika 5.3: Govor osebe A (bližnji signal). Po koncu filtriranja zajetega signala hočemo, da je rezultat čim bolj podoben temu signalu. Tako bi vedeli, da smo učinkovito odstranili daljni signal.

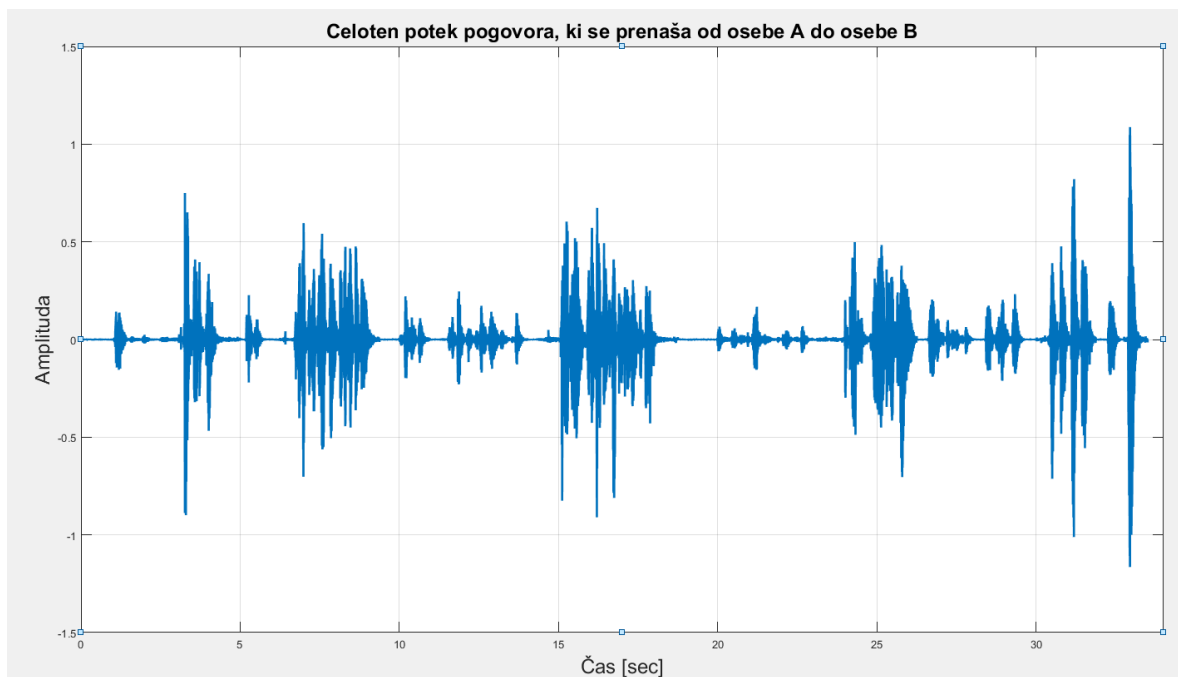
V okolje smo naložili tudi daljni govor, to je govor zajet na strani govorca B. Ta govor smo morali tudi modificirati, za razliko od bližnjega govora. Po predvajanju daljnega govora iz zvočnikov osebe A, ta namreč potuje po sobi in se odbije od zidov, pri tem oslabi, nato pa ga ponovno zajame zvočnik osebe A. Da smo dosegli želen signal, smo daljni govor filtrirali z digitalnim filtrom, ki smo ga ustvarili na začetku in tako v signal dodali efekt sobe. Signalu še zmanjšamo amplitudo, saj signal med potovanjem po sobi oslabi (slika 5.4). Ta signal se brez aktivnega filtriranja algoritmov AEC prenese nazaj do uporabnika B, kjer ta sliši svoj zakasnen govor.



Slika 5.4: Govor osebe B (daljni signal) zajet na strani uporabnika A. Govor je modificiran z učinkom sobe in dušenja. To je signal katerega hočemo eliminirati iz pogovora.

Ko združimo oba omenjena signala, bližnjega in daljnega, dobimo celoten potek govora (slika 5.5). V pogovor še dodamo šum, ki se pojavi pri zajemu z mikrofonom. Območje kjer prevladuje daljni signal v celotnem pogovoru, je časovno obdobje, v katerem govori govorec B, ta lasten govor pa se prenaša nazaj do njega. V kolikor ima daljni govor dovolj veliko amplitudo in je časovno zakasnen (običajno je zakasnitev prenosa posledica časa prenosa preko linije), to negativno vpliva na razumevanje pri osebi B.

Celoten pogovor lahko sedaj uporabimo kot testni signal za algoritme AEC, za referenco pa uporabimo čist daljni signal.

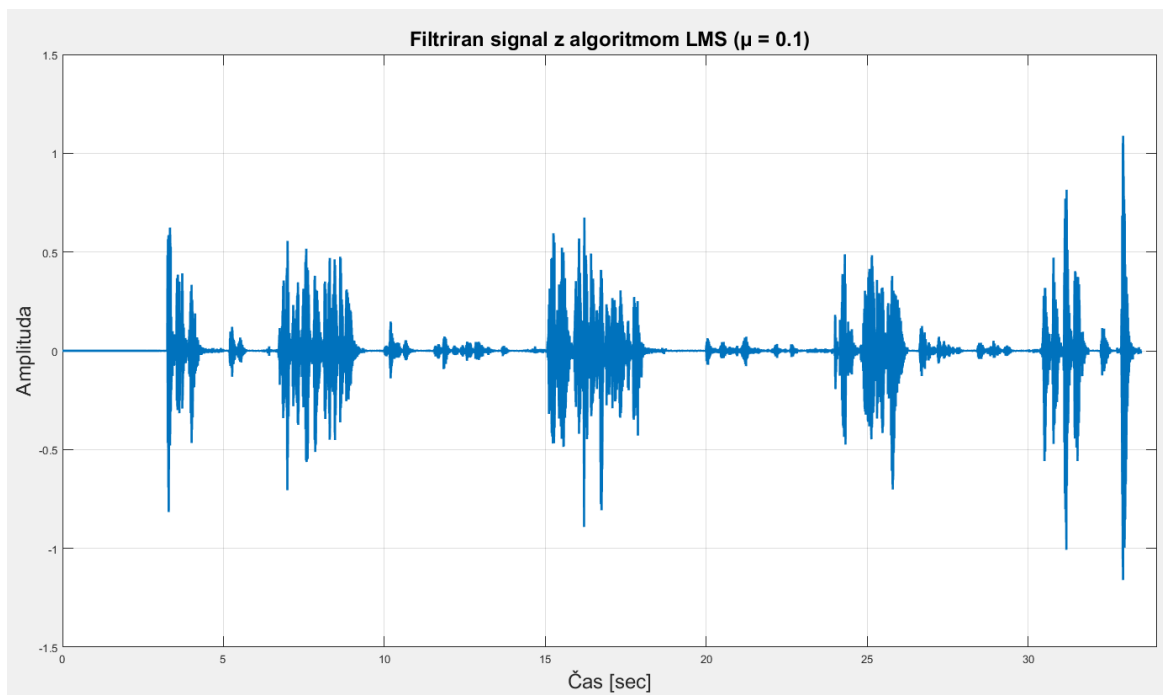


Slika 5.5: Celoten potek pogovora. Območja z večjo amplitudo so območja govora osebe A, območja z majhno amplituda pa območja zajema govora osebe B na strani govorca A, po tem ko se je ta govor tam predvajal.

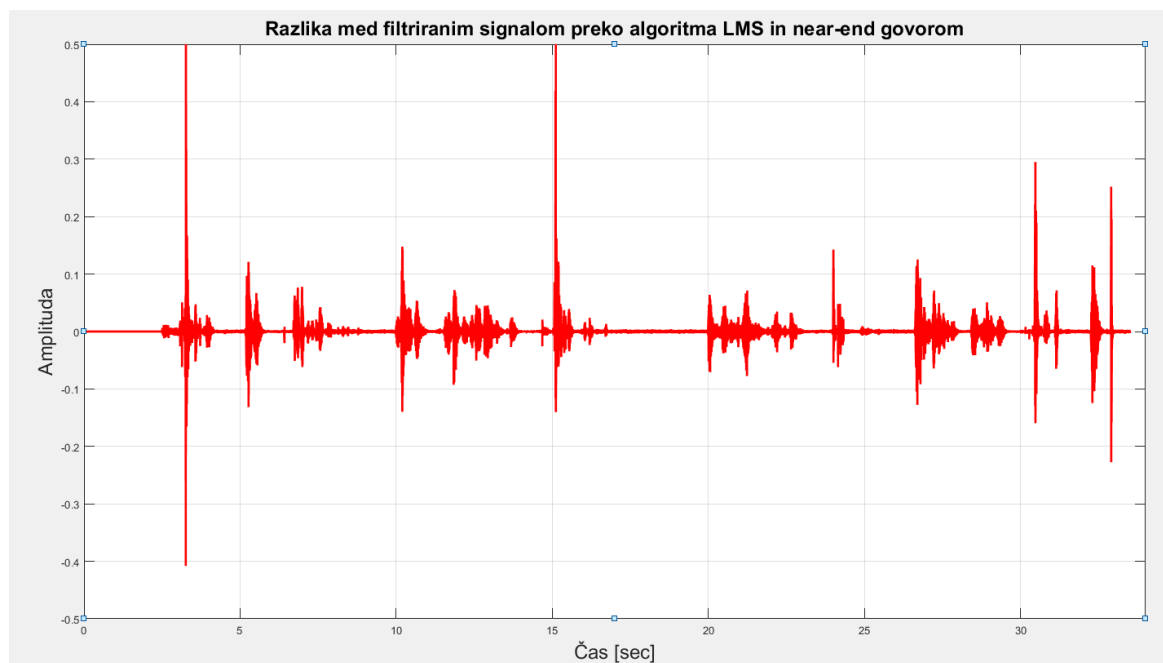
5.1.2 Testiranje algoritma LMS

Najprej smo zgradili objekt algoritma z določenimi parametri. Ustvarjen objekt je filter s spreminjajočimi se utežmi, ki izračuna filtriran izhod glede na algoritem LMS. Izbrali smo število uteži ter nastavili začetne pogoje filtra (to pomeni, da smo nastavili vse uteži filtra na 0 – v nekaterih primerih lahko uteži nastavimo na določeno vrednost, tako da filter učinkoviteje filtrira že na začetku) in velikost stopnice na vrednost 0,1. Enako vrednost stopnice smo uporabili tudi pri algoritmu NLMS, tako da lahko primerjamo učinkovitost algoritmov.

Če primerjamo filtriran signal skozi algoritem LMS in začetni skupni pogovor vidimo, da je algoritem odstranil nekatere dele daljnega govora, ostalim pa zmanjšal amplitudo (slika 5.6). Po odštetju skupnega govora in filtriranega signala, dobimo razliko, ki jo lahko predstavimo grafično (slika 5.7).



Slika 5.6: Skupno zajeti govor na strani osebe A, filtriran skozi algoritem LMS z velikostjo stopnice 0,1. Opaziti je, da je daljni govor še vedno prisoten vendar z zmanjšano amplitudo.



Slika 5.7: Razlika med filtriranim signalom in želenim. Vidimo lahko, da se kljub filtriranju, na stran uporabnika B prenese njegov lasten govor, ki pa ima zmanjšano amplitudo.

Vidimo lahko, da algoritem LMS v tem primeru ni bil dovolj učinkovit. Na stran uporabnika B se je prenesla večina njegovega govora, ki pa ima manjšo amplitudo. Če primerjamo filtriran in nefiltriran govor, vidimo, da je LMS še vedno boljše izbira, kot da prenašamo govor brez filtriranja. Dodatno optimizacijo bi lahko izvedli, če bi nastavili ustrezne začetne uteži in optimalno nastavili velikost stopnice. Sam vpliv stopnice na algoritme si bomo ogledali kasneje.

V okolju MATLAB smo definirali tudi formulo za izračun srednje kvadratične napake (root mean square error - RMSE) [39], ki jo uporabljamo za ugotavljanje razlike med dvema signaloma (5.2). Pri tem večja vrednost RMSE pomeni večjo razliko med signaloma.

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{N} \times \left(\sum_{n=0}^{N-1} (x(n) - y(n))^2\right)\right)} \quad (5.2)$$

Pri tem je:

RMSE = srednja kvadratična napaka (root mean square error),

N = število vseh vzorcev,

x(n) = vrednost filtriranega signala pri n-tem vzorcu in

y(n) = vrednost bližnjega signala pri n-tem vzorcu.

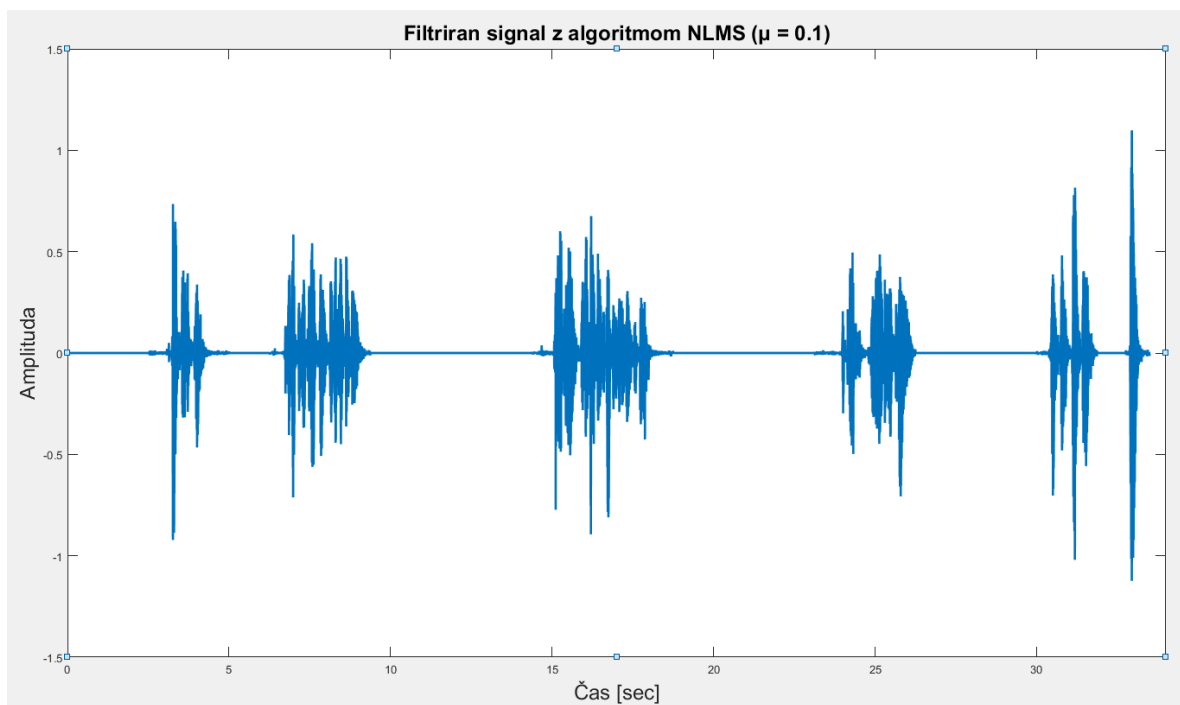
Rezultat RMSE za filtriran signal (x(n)) in bližnji govor (y(n)) je 0,0094. Kasneje bomo lahko to vrednost primerjali z ostalimi algoritmi.

5.1.3 Testiranje algoritma NLMS

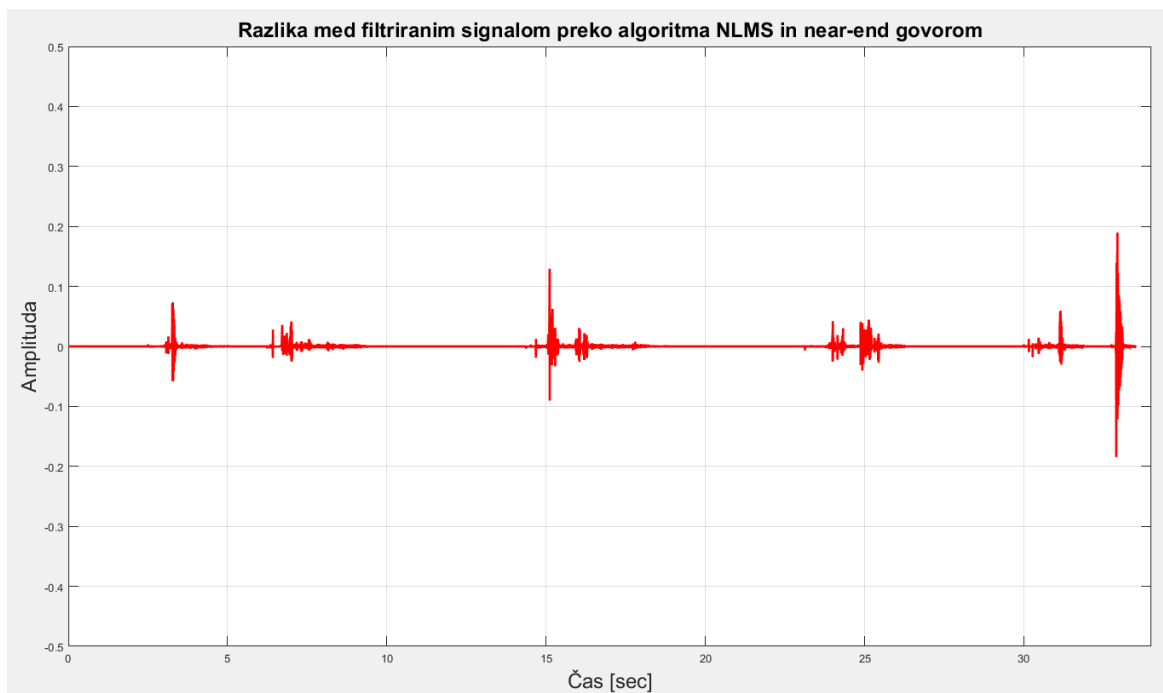
Enako kot pri algoritmu LMS smo ustvarili objekt, digitalni filter s spreminjajočimi se utežmi, ki je temeljil na osnovah algoritma NLMS. Deluje na enakem principu kot LMS, le da signal normaliziramo, kar posledično pomeni manjšo občutljivost algoritma na spreminjanje vhoda. Začetne uteži smo nastavili na 0, ter izbrali velikost stopnice 0,1.

Tako smo ustvarili objekt z enakimi parametri kot LMS, kar omogoča primerjavo učinkovitosti algoritmov.

Po enačbi (5.2) smo izračunali vrednost RMSE med končnim filtriranim signalom in bližnjim govorom, ter dobili vrednost 0,0027. Vrednost je nekaj več kot tri-krat manjša od vrednosti pri algoritmu LMS, kar potrjuje boljše delovanje algoritma NLMS.



Slika 5.8: Filtriran signal zajet na strani uporabnika A skozi algoritem NLMS. Opazimo lahko, da je daljni signal skoraj v celoti odstranjen. Razliko opazimo šele kot pogledamo odšteta signala (skupno zajet in bližnji signal).

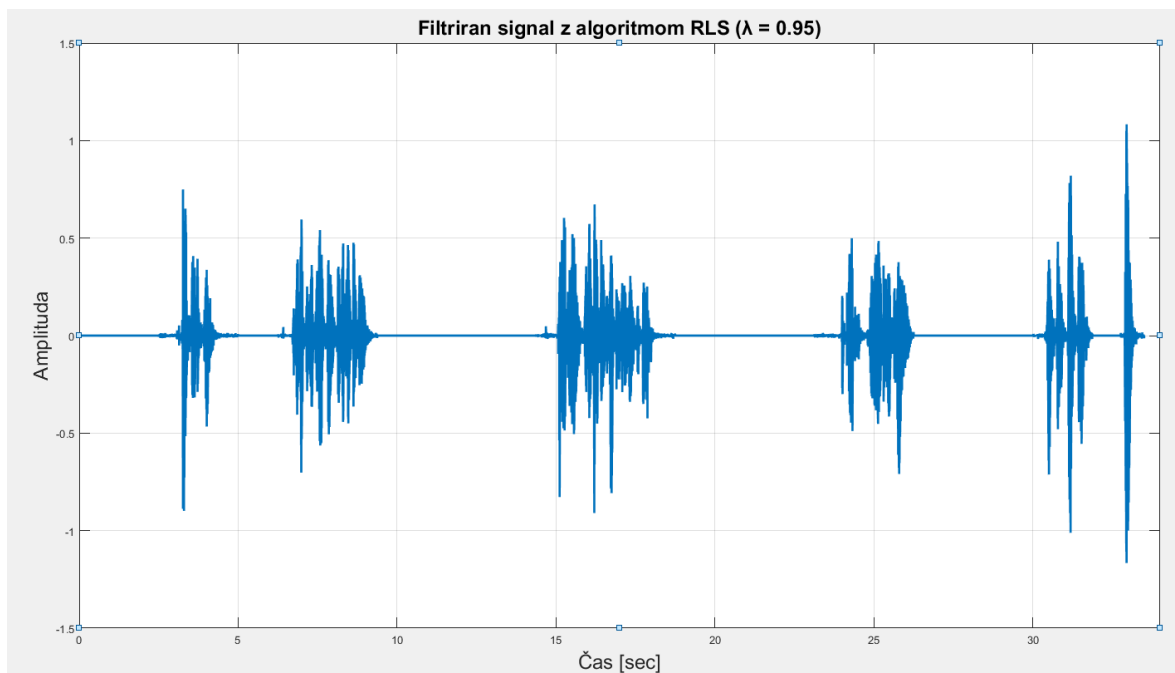


Slika 5.9: Razlika med filtriranim signalom in bližnjim govorom preko algoritma NLMS. V primerjavi z algoritmom LMS je opazno manjša razlika, kar pomeni boljše odstranjevanje akustičnega odmeva.

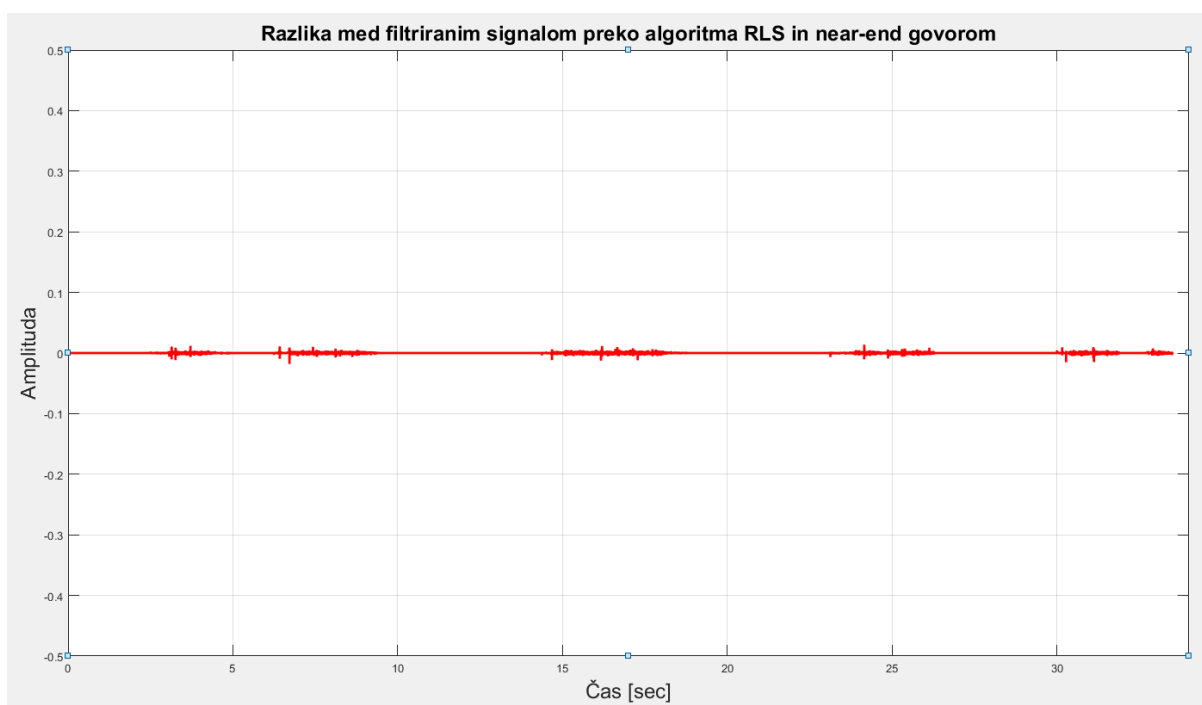
Če primerjamo algoritma NLMS in LMS lahko vidimo, da je algoritem NLMS veliko bolj učinkovit. Iz časovnega spektra filtriranega signala je opazno, da je daljni signal skoraj v celoti odstranjen (slika 5.8), kar potrди tudi slika razlike med filtriranim in bližnjim signalom (slika 5.9). Prednost algoritma NLMS pred algoritmom LMS je v manjši občutljivosti na spreminjanje vhoda in posledično v boljšem delovanju, prav tako pa je algoritem NLMS enako zahteven za implementacijo kot algoritem LMS. Zaradi tega se na večini signalnih procesorjev, na katerih poteka realno časovno filtriranje signalov, realizira algoritem NLMS.

5.1.4 Testiranje algoritma RLS

Enako kot pri prejšnjih dveh algoritmih smo tokrat ustvarili digitalni filter, ki temelji na rekurzivnem računanju uteži. Nastavili smo začetne pogoje, to je začetne uteži na 0, ter faktor pozabljivosti. Za razliko od družine algoritmov LMS, algoritmi RLS ne uporabljajo stopnice, temveč faktor pozabljivosti. Vrednost faktorja smo nastavili na 0,95 ($0 < \lambda < 1$). Večja vrednost faktorja tu pomeni večji vpliv starih uteži na računanje novih.



Slika 5.10: Filtriran signal skozi algoritem RLS. Signal ki ga dobimo na izhodu algoritma je skoraj identičen kot bližnji signal, kar govori o odličnem odstranjevanju odmeva.



Slika 5.11: Ko od filtriranega signala skozi algoritem RLS odštejemo bližnji govor, vidimo da je rešitev signal z zanemarljivo amplitudo. Iz tega sklepamo, da algoritem zelo hitro spreminja uteži (hitro konvergira) in je posledično odličen pri odstranjevanju akustičnega odmeva.

Ko pogledamo filtriran signal (slika 5.10) in razliko med filtriranim signalom ter bližnjim govorom (slika 5.11) vidimo, da z algoritmom RLS dosežemo najboljše rezultate. Nazaj k govorcu B se ni preneslo skoraj nič njegovega lastnega govora, saj je bila amplituda na povratnem signalu zanemarljiva. To priča o odličnem delovanju algoritma, ki je posledica hitre konvergence. V primerjavi z družino algoritmov LMS, ima algoritem RLS mnogo hitrejšo konvergenco. Da lahko izvajamo algoritem RLS, potrebujemo hranjenje podatkov, to je vrednosti starih uteži. Zaradi tega je povečana prostorska zahtevnost algoritma. Povečana je tudi zahtevnost izračuna novih uteži, zaradi zahtevnejše cenovne funkcije. Zaradi tega algoritma RLS pogosto ne implementiramo na signalnih procesorjih, temveč raje uporabimo algoritem NLMS. V kolikor bi želeli realizirati algoritem RLS na signalnem procesorju, bi potrebovali hiter procesor, ki bi bil zmožen sprotnega preračunavanja funkcije in več notranjega spomina kot pri družini algoritmov LMS.

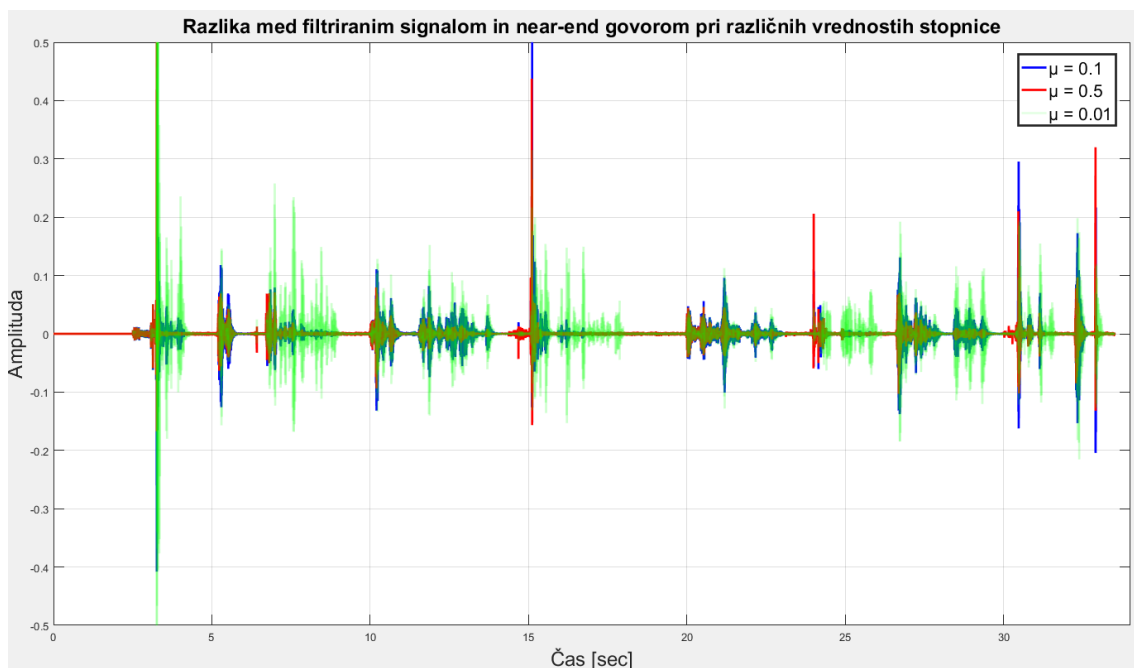
Ponovno smo izračunali (5.2) RMSE, ter dobili najmanjšo vrednost med tremi algoritmi, $7,0985e-4$. To potrjuje boljšo učinkovitost rekurzivnih algoritmov od veje algoritmov LMS.

5.1.5 Vpliv velikosti stopnice na delovanje LMS algoritma

Na delovanje družine algoritmov LMS ima velik vpliv velikost stopnice, zato je pomembno, kako jo pred začetkom izvajanja algoritma nastavimo.

Moderni algoritmi uporabljajo spreminjajočo se velikost stopnice, kar poveča njihovo učinkovitost. Vgrajene imajo sheme za zaznavo prisotnosti bližnjega govora in v tem času manjšajo vrednost stopnice, tako da se ob ponovni pojavitvi daljnega govora izognejo oscilaciji. Ob prisotnosti daljnega govora se vrednost stopnice ponovno poveča kar zagotavlja hitro konvergenco.

Pri klasičnih algoritmih, kot sta LMS in NLMS, je velikost stopnice statična. Preverili smo kako različne vrednosti stopnice vplivajo na učinkovitost odstranjevanja odmeva.



Slika 5.12: Vpliv različnih velikosti stopnic na delovanje algoritma LMS

Zelena funkcija (slika 5.12) predstavlja razliko med filtriranim signalom in bližnjim govorom, če v algoritmu LMS uporabimo majhno vrednost stopnice (0,01). Vidimo lahko,

da se je na stran govorca B preneslo veliko več njegovega govora, kot v primeru, ko smo za vrednost stopnice uporabili neko standardno vrednost (0,1 – modra funkcija). To je posledica zelo počasne konvergence algoritma. Zaradi majhne stopnice se vrednosti uteži spreminjajo počasi in posledično algoritem ne more slediti spremembam vhoda. Rezultat je, da se veliko daljnega govora ne filtrira.

V drugem primeru, rdeča funkcija, smo uporabili veliko vrednost stopnice (0,5). To zagotavlja hitro konvergenco, torej hitro spreminjanje vrednosti uteži, vendar pa vnaša tudi nestabilnost algoritma. Na sliki so vidne špice v amplitudi signala, ki nastanejo zaradi napačno nastavljenih uteži. Te so posledica oscilacij v bližini minimalnih vrednosti.

Iz procesa testiranja je razvidno, da napačno nastavljena velikost stopnice lahko poslabša delovanje algoritma.

6 ZAKLJUČEK

V konferenčnih sobah imamo pogosto težave z akustičnim odmevom, ki lahko nastopa v dveh oblikah. V prvi obliki se kaže kot akustični odmev sobe, ki nastane zaradi odboja zvoka od sten, v drugi kot direktni zvok iz zvočnikov, ki ga mikrofonski ponovno zajame pri pogovoru z drugo osebo. V obeh primerih velika časovna zakasnitev odmeva negativno vpliva na razumevanje govora.

V prvem primeru težave akustičnega odmeva sobe rešujemo s statičnimi pasivnimi komponentami, ki jih nameščamo na stene ali strop. Časovna zakasnitev odmeva v konferenčnih sobah je pogojena z velikostjo sobe in njeno prostornino. Odmev je še posebej izrazit v velikih prostorih. V kolikor želimo zajeti celotno frekvenčno slušno območje, iz katerega bomo odstranjevali odmev, moramo uporabiti kombinacijo različnih struktur. Najpogosteje uporabimo kombinacijo poroznih absorberjev, ki so dobri odstranjevalci srednjih in visokih frekvenc, ter resonatorjev, s katerimi odstranjujemo odmev nizke frekvence. Namesto resonatorjev bi lahko uporabili tudi membranske absorberje, vendar je njihova namestitve bolj omejujoča, saj za njih potrebujemo več prostora. Tako je njihova uporaba omejena na druge namenske prostore.

Pri pogovoru z drugimi osebami preko prostoročnega telefona ali VoIP, moramo odstraniti direktni zvok iz zvočnikov, ki ga zajame mikrofonski. V kolikor tega ne storimo, naš sogovorec sliši lasten govor z zamikom. Če se zgodi, da imamo slabo akustiko prostora, se lahko ta direktni zvok še odbije od sten in zajame v obliki odmeva sobe. Za odstranjevanje takšnega odmeva uporabljamo algoritme AEC. V preteklosti je bil pogosti uporabljen način pogovora "half-duplex", vendar je bil preveč omejujoč, v smislu, da ni omogočal pravega dvosmernega pogovora. Takrat je ena oseba v pogovoru lahko samo poslušala. Boljša rešitev so algoritmi za odstranjevanje odmeva. Algoritmom priskrbimo referenco govora, ter jih namestimo na DSP, kjer se izvajajo konstantno z zajemom zvoka.

Algoritmi se delijo na dve družini, prva izmed njih deluje na principu najmanjšega povprečnega kvadrata, druga na principu rekurzije. Algoritmi dinamično spreminjajo uteži

filtra, s tem spreminjajo prenosno funkcijo digitalnega filtra in ustvarjajo enak signal obratne amplitude, ki ga prištejejo odmevu. Algoritmi, ki delujejo na osnovi rekurzije, potrebujejo več notranjega spomina za hranjenje vrednosti uteži, ter močnejše signalne procesorje, saj imajo kompleksnejšo cenovno funkcijo za izračun uteži. To pomanjkljivost nadomestijo z odlično učinkovitostjo. Zaradi tega jih lahko uporabljamo v vseh aplikacijah, ki ne zahtevajo delovanja v realnem času. Če jih želimo realizirati na signalnem procesorju, potrebujemo hiter procesor in več notranjega spomina, kot pri drugih algoritmih. Med boljše algoritme spada algoritem NLMS, ki se večinoma uporablja na DSP-jih. Ima podobno dobro učinkovitost kot rekurzivni algoritmi z manj zahtevno implementacijo. Uporablja se tudi različica algoritma LMS, algoritem TVLMS, medtem ko je sam LMS zastarel, saj obstajajo boljše rešitve. Pri drevesu algoritmov LMS moramo paziti tudi na ustrezno nastavljeno velikost stopnice, saj njena prevelika ali premajhna vrednost negativno vpliva na odstranjevanje samega odmeva. S trenutnimi platformami DSP, ki imajo hitre procesorje in poceni notranji spomin, se splača implementirati algoritme RLS, saj ti zagotavljajo najboljšo učinkovitost.

Za nadaljnje testiranje bi lahko preizkusili še kakšen algoritem, testirali formulo za izračun ustrezne stopnice ter preučili in preizkusili vpliv faktorja pozabljivosti na rekurzivne algoritme. Dodatno bi lahko analizirali, kako učinkoviti so algoritmi pri odstranjevanju ne samo direktnega zvoka, temveč tudi odboja (odmev sobe), ter vpliv šuma okolice. Same algoritme bi lahko iz računalniškega testnega okolja prenesli tudi na konkretni DSP, ter preučili njihovo učinkovitost na realnih primerih.

Za odstranjevanje odmeva konferenčnih sob ter odmeva pri pogovoru s prostoročnim telefonom je torej potrebna celostna rešitev. Le tako lahko dosežemo optimalne razmere za pogovor, ki niso moteče tako za osebe v konferenčni sobi, kot za sogovorce na drugi strani mikrofona.

7 VIRI

1. How is sound made. Dostopno na: <https://www.reference.com/science/sound-made-81ccaba4b370d334> [24. 8. 2017].
2. What determines the speed of sound in different mediums. Dostopno na: <https://www.quora.com/What-determines-the-speed-of-sound-in-different-mediums> [24. 8. 2017].
3. Speed of Sound in Air. Dostopno na: <http://pages.mtu.edu/~suits/SpeedofSound.html> [24. 8. 2017].
4. Speed of sound. Dostopno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Speed_of_sound [24. 8. 2017].
5. Perceived Human Hearing. Dostopno na: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Perceived_Human_Hearing.png [24. 8. 2017].
6. Jakost zvoka. Dostopno na: https://sl.wikipedia.org/wiki/Jakost_zvoka [24. 8. 2017].
7. Loudness. Dostopno na: <https://en.wikipedia.org/wiki/Loudness> [24. 8. 2017].
8. Audio frequency. Dostopno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Audio_frequency [24. 8. 2017].
9. Slovar | Akustika. Dostopno na: <http://www.armstrong.si/commclgeu/eu1/sl/si/glossary-acoustics.html> [24. 8. 2017].
10. Prostorska akustika. Dostopno na: <http://www.decibel.si/prostorska-akustika/prostorska-akustika> [24. 8. 2017].
11. Whole System Acoustical Treatments. Dostopno na: <https://continuingeducation.bnppmedia.com/courses/multi-aia/whole-system-acoustical-treatments/4/> [24. 8. 2017].
12. Acoustics 101 for Architects. Dostopno na: <http://www.sound-image.com/wp-content/uploads/Acoustics-101-for-Architects.pdf> [24. 8. 2017].
13. Sabine's Formula & The Birth of Modern Architectural Acoustics. Dostopno na: <https://www.thermaxxjackets.com/sabine-modern-architectural/> [24. 8. 2017].
14. Reverberation. Dostopno na: <https://en.wikipedia.org/wiki/Reverberation> [24. 8. 2017].
15. Reverberation and absorption. Dostopno na: <http://www.troldtekt.com/Product-properties/Good-acoustics/Acoustics-for-advanced/Reverberation-and-absorption> [24. 8. 2017].
16. Different absorber types. Dostopno na: <http://www.troldtekt.com/Product-properties/Good-acoustics/Acoustics-for-advanced/Different-absorber-types> [24. 8. 2017].
17. Sound absorption. Dostopno na: <http://www.paroc.com/knowhow/sound/sound-absorption> [24. 8. 2017].

18. Absorberji zvoka. Dostopno na: <http://www.decibel.si/prostorska-akustika/produkti/absorberji-zvoka> [24. 8. 2017].
19. Choosing & Using Porous Absorbers. Dostopno na: <https://www.soundonsound.com/reviews/choosing-using-porous-absorbers> [25. 8. 2017].
20. Metal Foam in Scanning Electron Microscope. Dostopno na: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Metal_Foam_in_Scanning_Electron_Microscope,_magnification_10x.GIF [25. 8. 2017].
21. Acoustic Echo Cancellation. Dostopno na: <http://www.lectrosonics.com/Support/ASPEN/acoustic-echo-cancellation.html> [26. 8. 2017].
22. Duplex (telecommunications). Dostopno na: [https://en.wikipedia.org/wiki/Duplex_\(telecommunications\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Duplex_(telecommunications)) [26. 8. 2017].
23. Recursive least squares filter. Dostopno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Recursive_least_squares_filter [26. 8. 2017].
24. AEC in Audia and Nexia. Dostopno na: https://support.biamp.com/Audia-Nexia/Miscellaneous/AEC_in_Audia_and_Nexia [26. 8. 2017].
25. Nonlinear filter. Dostopno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Nonlinear_filter [26. 8. 2017].
26. Least mean squares filter. Dostopno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Least_mean_squares_filter [26. 8. 2017].
27. The Pentagon Shape, from recognition to construction. Dostopno na: <http://www.k6-geometric-shapes.com/pentagon-shape.html> [26. 8. 2017].
28. Pyramid foam sound insulation material. Dostopno na: http://d13z1xw8270sfc.cloudfront.net/origin/312718/1443207449859_pyramid-foam-sound-insulation-material-pyamid-insulation.jpg [26. 8. 2017].
29. Absorption. Dostopno na: <http://www.dpamicrophones.com/mic-university/10-important-facts-about-acoustics-for-microphone> [26. 8. 2017].
30. Čudina M. TEHNIČNA AKUSTIKA: Merjenje, vrednotenje in zmanjševanje hrupa in vibracij. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, 2014.
31. Sound absorption indicators. Dostopno na: <http://exp.rockfon.com/performance/acoustics/how+to+compare+ceiling+acoustics/sound+absorption+indicators> [27. 8. 2017].
32. Average absorption area of a standing person. Dostopno na: <http://www.amsacoustics.co.uk/pdfs/IR-57-Absofanaverageperson.pdf> [27. 8. 2017].

33. Sound absorption. Dostopno na: http://wiki.naturalfrequency.com/wiki/Sound_Absorption [27. 8. 2017].
34. Absorption coefficients. Dostopno na: http://www.acoustic.ua/st/web_absorption_data_eng.pdf [27. 8. 2017].
35. What is meant by a system's impulse response and frequency response. Dostopno na: <https://dsp.stackexchange.com/questions/536/what-is-meant-by-a-systems-impulse-response-and-frequency-response> [28. 8. 2017].
36. Comparison between Adaptive filter Algorithms (LMS, NLMS and RLS). Dostopno na: <https://pdfs.semanticscholar.org/ae26/1153face27a228b0ff2697919a3311e3962d.pdf> [28. 8. 2017].
37. Recursive least squares filter. Dostopno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Recursive_least_squares_filter [28. 8. 2017].
38. Frequency response. Dostopno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Frequency_response [28. 8. 2017].
39. Root mean square deviation. Dostopno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Root-mean-square_deviation [28. 8. 2017].
40. Acoustic Echo Cancellation (AEC). Dostopno na: <https://www.mathworks.com/help/audio/examples/acoustic-echo-cancellation-aec.html?requestedDomain=www.mathworks.com> [29. 8. 2017].

Priloga A

MATLAB koda

```
fs = 16000;

M = fs/2 + 1;
frameSize=2048;

[B,A] = cheby2(4,20,[0.1 0.7]); %n,Rs,Ws
%dobimo prenosno funkcijo n-tega reda, z normalizirano mejno frekvenco Ws
(dve pomenita band pass) in
%Rs flukcuacije

freqz(B,A); %narisi magnitude response
impulseResponseGenerator = dsp.IIRFilter('Numerator', B, 'Denominator',
A);

FVT = fvtool(impulseResponseGenerator); %vbistvo smo naredli
frekvenci odziv sobe, ki nam
%bo sluzil kot neznana prenosna fukcija prostora

impulzni_odziv = step(impulseResponseGenerator,
(log(0.99*rand(1,M)+0.01).*sign(randn(1,M)).*exp(-0.002*(1:M))))');
%spustimo signal skozi filter, ki smo ga naredli. Signal je dirakov
impulz
%predstavljen z log(...). To naredimo posebj zato, da dobimo impulzni
%odziv v "continuous time" domeni v razliko od diskretne, ki jo lahko
%pogledamo na filtri.

impulzni_odziv = impulzni_odziv/norm(impulzni_odziv);
impulzni_odziv = impulzni_odziv * 4;

test = dsp.FIRFilter('Numerator', impulzni_odziv'); %naredi se
filter skoz kerega farspeech signal

plot(0:1/fs:0.5, impulzni_odziv); %os x - od 0 do 0,5 sekunde z
korakom 1/fs
xlabel('Cas [sec]');
ylabel('Normalizirana amplituda');
title('Impulzni odziv sobe');

load nearspeech %load -> nalozi iz datoteke
n = 1:length(v); %n predstavlja signal od 1 do
njegove dolzine in je vektor
t = n/fs; %x-os delimo z sampling
frekvenco
f3 = figure;

plot(t,v); %plot(x,y) -> plot(t-34, v-
signal)
axis([0 34 -1.5 1.5]); %x-os od 0 do 34, y od -1.5
do 1.5
xlabel('Time [sec]');
ylabel('Amplitude');
```

```

title('Near end speech Signal');

adw = audioDeviceWriter('SampleRate', fs); %audio device

nearSpeechSource = dsp.SignalSource('Signal', v, 'SamplesPerFrame',
2048);

%while(~isDone(nearSpeechSource))

%   nearSpeech = step(nearSpeechSource);           %izluscimo en del
nearspeech signala
%   step(adw, nearSpeech);                         %izluscen del posljemo
audio device za predvajanje
    %step(nearSpeechScope,nearSpeech);

%end

load farspeech
n2 = 1:length(x);
t2 = n2/fs;
f4 = figure;
plot(t2,x);
axis([0 34 -1 1]);
xlabel('Time [sec]');
ylabel('Amplitude');
title('Far end speech signal');

farSpeechSource = dsp.SignalSource('Signal', x, 'SamplesPerFrame', 2048);

%while(~isDone(farSpeechSource))

%   farSpeech = step(farSpeechSource);
%   step(adw, farSpeech);
%end

noviFarSpeech = step(test,x);           %dodan je efekt sobe
noviFarSpeech = noviFarSpeech/4;
f12 = figure;
plot(t2, noviFarSpeech);
axis([0 34 -1 1]);
xlabel('Time [sec]');
ylabel('Amplitude');
title('Novi far speech');

%zajem =v+x;
zajem = v+noviFarSpeech;
zajem = zajem + 0.001*randn(268000,1); %randn vrne matriko 2048x1
f5 = figure;
plot(t2,zajem);
axis([0 34 -1.5 1.5]);
xlabel('Time [sec]');
ylabel('Amplitude');
title('Signal zajet na uporabnikovi strani: near speech + far end
speech');

```

```

%bothSources = dsp.SignalSource('Signal', zajem, 'SamplesPerFrame',
2048);
reset(nearSpeechSource);
reset(farSpeechSource);
bothSources = dsp.SignalSource('Signal', zajem, 'SamplesPerFrame', 2048);
%while(~isDone(bothSources))

%   speech= step(bothSources);
%   step(adw, speech);
%end

lms = dsp.LMSFilter('Method', 'LMS', 'Length', 10, 'StepSize', 0.1,
'InitialConditions', 0);

[signal, error, utezi] = step(lms,zajem,v);
f6 = figure;
plot(t2, signal);
axis([0 34 -1.5 1.5]);
xlabel('Time [sec]');
ylabel('Amplitude');
title('Filtriran signal skozi LMS');

f13 = figure;
plot(t2, error);
axis([0 34 -1.5 1.5]);
xlabel('Time [sec]');
ylabel('Amplitude');
title('Error signal');

nlms = dsp.LMSFilter('Method', 'Normalized LMS', 'Length', 10,
'StepSize', 0.1, 'InitialConditions', 0);
[signal2, err2, utezi2] = step(nlms, zajem, v);
f7 = figure;
plot(t2, signal2);
axis([0 34 -1.5 1.5]);
xlabel('Time [sec]');
ylabel('Amplitude');
title('Filtriran signal skozi NLMS');

rls = dsp.RLSFilter('Method', 'Conventional RLS', 'Length', 10,
'ForgettingFactor', 0.95, 'InitialCoefficients', 0);
[signal3, err3] = step(rls, zajem, v);
f8 = figure;
plot(t2, signal3);
axis([0 34 -1.5 1.5]);
xlabel('Time [sec]');
ylabel('Amplitude');
title('Filtriran signal skozi RLS');

razlikaLMS = signal - v;
razlikaNLMS = signal2 - v;
razlikaRLS = signal3 - v;
f9 = figure;
plot(t2, razlikaLMS);
axis([0 34 -0.5 0.5]);
xlabel('Razlika med LMS signalom in nearspeechom');

```

```

ylabel('Amplitude');
title('Razlika med LMS signalom in narspeechom');

f10 = figure;
plot(t2, razlikaNLMS);
axis([0 34 -0.5 0.5]);
xlabel('Razlika med NLMS signalom in narspeechom');
ylabel('Amplitude');
title('Razlika med NLMS signalom in narspeechom');

f11 = figure;
plot(t2, razlikaRLS);
axis([0 34 -0.5 0.5]);
xlabel('Razlika med RLS signalom in narspeechom');
ylabel('Amplitude');
title('Razlika med RLS signalom in narspeechom');

RMSE = sqrt(mean((razlikaLMS).^2));
disp(RMSE);

RMSE2 = sqrt(mean((razlikaNLMS).^2));
disp(RMSE2);

RMSE3 = sqrt(mean((razlikaRLS).^2));
disp(RMSE3);

```



Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko

IZJAVA O AVTORSTVU IN ISTOVETNOSTI TISKANE IN ELEKTRONSKE OBLIKE ZAKLJUČNEGA DELA

Ime in priimek študent-a/-ke: Gregor Kovačevič

Študijski program: Univerzitetni študijski program Elektrotehnika, smer elektronika

Naslov zaključnega dela: Odstranjevanje akustičnega odmeva

Mentor: dr. Zdravko Kačič

Somentor: _____

Podpisan-i/-a študent/-ka Gregor Kovačevič

- izjavljam, da je zaključno delo rezultat mojega samostojnega dela, ki sem ga izdelal/-a ob pomoči mentor-ja/-ice oz. somentor-ja/-ice;
- izjavljam, da sem pridobil/-a vsa potrebna soglasja za uporabo podatkov in avtorskih del v zaključnem delu in jih v zaključnem delu jasno in ustrezno označil/-a;
- na Univerzo v Mariboru neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico ponuditi zaključno delo javnosti na svetovnem spletu preko DKUM; sem seznanjen/-a, da bodo dela deponirana/objavljena v DKUM dostopna široki javnosti pod pogoji licence Creative Commons BY-NC-ND, kar vključuje tudi avtomatizirano indeksiranje preko spleta in obdelavo besedil za potrebe tekstovnega in podatkovnega rudarjenja in ekstrakcije znanja iz vsebin; uporabnikom se dovoli reproduciranje brez predelave avtorskega dela, distribuiranje, dajanje v najem in priobčitev javnosti samega izvirnega avtorskega dela, in sicer pod pogojem, da navedejo avtorja in da ne gre za komercialno uporabo;
- dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v zaključnem delu in tej izjavi, skupaj z objavo zaključnega dela;
- izjavljam, da je tiskana oblika zaključnega dela istovetna elektronski obliki zaključnega dela, ki sem jo oddal/-a za objavo v DKUM.

Uveljavljam permisivnejšo obliko licence Creative Commons: _____ (navedite obliko)

Začasna nedostopnost:

Zaključno delo zaradi zagotavljanja konkurenčne prednosti, zaščite poslovnih skrivnosti, varnosti ljudi in narave, varstva industrijske lastnine ali tajnosti podatkov naročnika:

_____ (naziv in naslov
naročnika/institucije) ne sme biti javno dostopno do _____ (datum odloga
javne objave ne sme biti daljši kot 3 leta od zagovora dela). To se nanaša na tiskano in
elektronsko obliko zaključnega dela.

Temporary unavailability:

To ensure competition priority, protection of trade secrets, safety of people and nature, protection of industrial property or secrecy of customer's information, the thesis _____(institution/company name and address) must not be accessible to the public till _____(delay date of thesis availability to the public must not exceed the period of 3 years after thesis defense). This applies to printed and electronic thesis forms.

Datum in kraj:

Podpis študent-a/-ke:

Podpis mentor-ja/-ice: _____
(samo v primeru, če delo ne sme biti javno dostopno)

Ime in priimek ter podpis odgovorne osebe naročnika in žig:

(samo v primeru, če delo ne sme biti javno dostopno)