

Četveropojasni parametarski ekvalizator za obradu audiosignala u obliku VST dodatka

Jin, Yu Xing

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:455962>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-26**



Repository / Repozitorij:

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

ZAVRŠNI RAD br. 1467

**ČETVEROPOJASNI PARAMETARSKI EKVALIZATOR ZA
OBRADU AUDIOSIGNALA U OBLIKU VST DODATKA**

Yu Xing Jin

Zagreb, lipanj 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

ZAVRŠNI RAD br. 1467

**ČETVEROPOJASNI PARAMETARSKI EKVALIZATOR ZA
OBRADU AUDIOSIGNALA U OBLIKU VST DODATKA**

Yu Xing Jin

Zagreb, lipanj 2024.

ZAVRŠNI ZADATAK br. 1467

Pristupnica: **Yu Xing Jin (0036529613)**

Studij: Elektrotehnika i informacijska tehnologija i Računarstvo

Modul: Računarstvo

Mentor: izv. prof. dr. sc. Marko Horvat

Zadatak: **Četveropojasni parametarski ekvalizator za obradu audiosignala u obliku VST dodatka**

Opis zadatka:

Frekvencijska obrada audiosignala prvi je korak u procesu produkcije zvuka, s ciljem promjene spektralnog sadržaja signala. Pritom se koriste postupci filtriranja, kojim se dio spektralnog sadržaja trajno uklanja iz signala, kao i ekvalizacije, kojom se dijelovi spektralnog sadržaja signala u određenom frekvencijskom području naglašavaju ili prigušuju u odnosu na sadržaj u ostatku čujnog područja frekvencija. Osim u produkciji zvuka, postupak ekvalizacije često se primjenjuje radi korekcije amplitudno-frekvencijske karakteristike zvučnika u sustavima ozvučenja. U ovome je radu potrebno teorijski obraditi osnovne koncepte frekvencijske obrade audiosignala, što uključuje prikaz osnovnih karakteristika i parametara standardnih tipova filtara koji se koriste pri filtriranju audiosignala, kao i osnovnih karakteristika standardnih tipova ekvalizatora: grafičkog (engl. graphic equalizer), parametarskog (engl. parametric equalizer) te filtra s dva područja propuštanja (engl. shelving filter). U praktičnom je dijelu potrebno realizirati VST dodatak koji sadrži parametarski ekvalizator izveden od četiri neovisna modula. Za svaki modul treba implementirati mogućnost namještanja središnje frekvencije na bilo koju vrijednost u čujnom području frekvencija, tj. od 20 do 20000 Hz, namještanja pojačanja u rasponu od -15 do +15 dB te namještanja relativne širine pojasa u rasponu od 0,1 do 2 oktave. U grafičkom korisničkom sučelju treba realizirati i grafički prikaz ukupne amplitudno-frekvencijske karakteristike ekvalizatora.

Rok za predaju rada: 14. lipnja 2024.

Sadržaj

Uvod	1
Frekvencijska obrada signala.....	2
1.1. Filtriranje	2
1.1.1. Niskopropusni filter (engl. lowpass filter).....	2
1.1.2. Visokopropusni filter (engl. highpass filter).....	3
1.1.3. Pojasnopropusni filter (engl. bandpass filter).....	4
1.1.4. Pojasna brana (engl. bandstop filter)	5
1.1.5. Uskopojasna brana (engl. notch filter)	6
1.2. Ekvalizacija	6
1.2.1. Grafički ekvalizator	8
1.2.2. Ekvalizator s dva područja propuštanja (engl. shelving filter).....	8
1.2.3. Parametarski ekvalizator.....	9
1.2.4. Parametri parametarskog ekvalizatora.....	10
Četveropojasni parametarski ekvalizator.....	13
Programski kod za izvedbu četveropojasnog parametarskog ekvalizatora	15
1.3. Inicijalizacija EQ filtera.....	15
1.4. Obrada promjena parametara.....	16
1.5. Prikaz frekvencijskog odziva ekvalizatora	17
1.6. Definiranje raspona i inicijalnih vrijednosti parametara ekvalizatora.....	19
1.7. Kreiranje korisničkog sučelja za kontrolu rada i izbor vrijednosti parametara četveropojasnog ekvalizatora	19
Zaključak	23
Literatura	24
Sažetak.....	25
Summary.....	26

Uvod

Digitalni ekvalizatori ključni su alati kojima se ostvaruje frekvencijska obrada audiosignala preciznim podešavanjem spektralnog sadržaja audiosignala radi postizanja željene kvalitete pri produkciji zvučnog sadržaja, a ujedno su i nezaobilazna komponenta elektroakustičkog lanca namijenjenog reprodukciji zvuka u kojem služe prvenstveno za korekciju frekvencijske karakteristike sustava za reprodukciju zvuka, tj. zvučnika kao dijela toga sustava kojemu je takva korekcija najpotrebnija. Područje njihove primjene široko je i uključuje studijsku glazbenu produkciju, događaje i nastupe uživo, kao i razne druge aplikacije u industriji zabave i komunikacijama općenito.

U ovom je radu prikazan dizajn, implementacija i ocjena funkcionalnosti četveropojasnog digitalnog ekvalizatora izvedenog od četiri neovisna modula, a svakom se modulu mogu namjestiti sva tri parametra koji definiraju rad parametarskog ekvalizatora, a to su središnja frekvencija, pojačanje i širina pojasa propuštanja. Namještanjem vrijednosti ovih parametara omogućeno je unošenje finih promjena u spektralni sadržaj audiosignala i zvuka koji je njime predstavljen. Ugađanjem središnje frekvencije i širine pojasa propuštanja odabire se određeno frekvencijsko područje u kojem djeluje ekvalizator, dok se vrijednošću pojačanja određuje hoće li spektralni sadržaj audiosignala u odabranom frekvencijskom području biti naglašen ili prigušen i koliko.

Ovim radom želi se doprinijeti razumijevanju rada digitalnih ekvalizatora i pružiti korisne smjernice za njihovu primjenu u praksi.

Frekvencijska obrada signala

Frekvencijska obrada audiosignala za posljedicu ima promjenu spektralnog sadržaja izlaznog audiosignala u odnosu na ulazni te počiva na dvama postupcima koji se nazivaju filtriranje i ekvalizacija.

1.1. Filtriranje

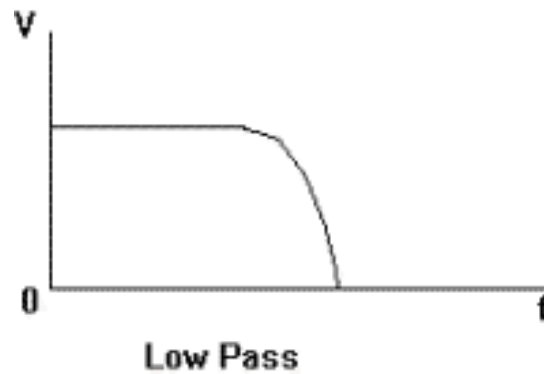
Filtriranje audiosignala jedan je od načina frekvencijske obrade signala. Možemo ga smatrati invazivnim postupkom obrade signala jer samo onaj dio spektra audiosignala koji se nalazi unutar područja propuštanja upotrijebljenog filtra ostaje sačuvan, dok se preostali dio spektra audiosignala koji se nalazi u području gušenja filtra uklanja iz ukupnog signala te ga nakon postupka filtriranja više nije moguće rekonstruirati.

Filtriranje audiosignala počiva na četiri osnovna tipa filtara koji će biti prikazani u nastavku.

Zajedničke karakteristike svih tipova filtara su područje propuštanja (engl. passband) i područje gušenja (engl. stopband) filtra definirano jednom ili dvjema graničnim frekvencijama (engl. cutoff frequency), kao i red filtra (engl. filter order) kojim je određena strmina prijelaza frekvencijske karakteristike filtra (engl. filter slope) iz područja propuštanja u područje gušenja. Pritom je uz veći red filtra veća i strmina prijelaza.

1.1.1. Niskopropusni filter (engl. lowpass filter)

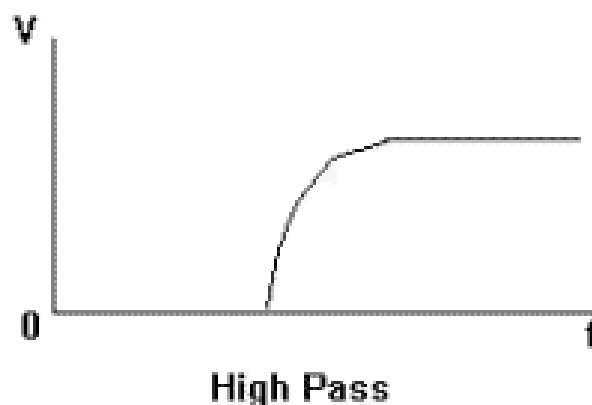
Niskopropusni filter je elektronički sklop ili uređaj, odnosno programski kod koji omogućava propuštanje signala s frekvencijama nižim od gornje granične frekvencije filtra. Time se sadržaj signala na frekvencijama višim od granične znatno umanjuje ili u potpunosti uklanja iz ukupnog signala. Osim gornjom graničnom frekvencijom, niskopropusni filter određen je i pojačanjem u području propuštanja te redom filtra i faktorom dobrote Q oko gornje granične frekvencije. Za potrebe audioprodukcije koriste se uglavnom niskopropusni filteri glatkog frekvencijskog odziva, niskog reda (prvi ili drugi, rjeđe viši redovi) te pojačanja u području propuštanja od 0 dB, što znači da im je primarni cilj ukloniti neželjene visokofrekvencijske komponente u signalu, bez potrebe za pojačavanjem dijela signala koji se propušta.



Sl. 1.1 Niskopropusni filter

1.1.2. Visokopropusni filter (engl. highpass filter)

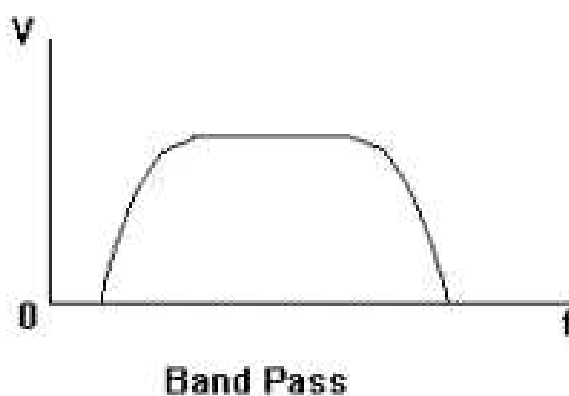
Visokopropusni filter je elektronički sklop ili uređaj, odnosno programski kod koji omogućava propuštanje signala s frekvencijama višim od donje granične frekvencije filtra. Time se sadržaj signala na frekvencijama nižim od granične znatno umanjuje ili u potpunosti uklanja iz ukupnog signala. Osim donjom graničnom frekvencijom, visokopropusni je filter, kao i niskopropusni, određen i pojačanjem u području propuštanja te redom filtra i faktorom dobrote Q oko gornje granične frekvencije. Za potrebe audioprodukcije koriste se uglavnom visokopropusni filtri glatkog frekvencijskog odziva te niskog reda (prvi ili drugi, rjeđe viši redovi). Pojačanje filtra u području propuštanja i ovdje je 0 dB. U audioprodukciji se visokopropusni filtri često koriste za uklanjanje sadržaja u audiosignalu na najnižim frekvencijama koji često potječe iz okoline (npr. klimatizacija i ventilacija u prostoriji), a pri snimanju su zabilježeni praktički svim upotrijebljenim mikrofonomima. Ne ukloni li se taj sadržaj, pri obradi audiosignala i izradi završne snimke snimljeni niskofrekvencijski sadržaj u pojedinim trakama zbraja se i u konačnoj dvokanalnoj snimci je često vrlo izražen. Zbog toga je za svaki instrument ili vokal potrebno znati područje frekvencija u kojem on proizvodi zvuk kako bi se odredila donja granična frekvencija ispod koje nema korisnog zvuka instrumenta, već samo smetnji iz okoline koje je potrebno ukloniti.



Sl. 1.2 Visokopropusni filter

1.1.3. Pojasnopropusni filter (engl. bandpass filter)

Pojasnopropusni filter je elektronički sklop ili uređaj, odnosno programski kod koji omogućava propuštanje signala unutar područja frekvencija određenog dvjema graničnim frekvencijama, tj. donjom i gornjom graničnom frekvencijom filtra. Kao posljedica djelovanja pojasnopropusnog filtra, sadržaj signala izvan područja propuštanja znatno se umanjuje ili u potpunosti uklanja iz ukupnog signala. Kao i prethodni tipovi filtera, pojasnopropusni filter nije određen samo svojim graničnim frekvencijama, nego i pojačanjem u području propuštanja te redom filtra i faktorom dobrote Q oko središnje frekvencije filtra koja definira sredinu područja propuštanja. Za potrebe audioprodukcije filteri ovog tipa glatkog su frekvencijskog odziva i blagog prijelaza iz područja propuštanja u područje gušenja filtra, čime se unosi minimalna količina izobličenja u signal koji se obrađuje filtrom. Pojačanje filtra u području propuštanja i sada obično iznosi 0 dB, jer je osnovni zadatak filtra izdvojiti korisni dio spektra signala, a ukloniti onaj koji nije potreban u daljnjoj obradi.



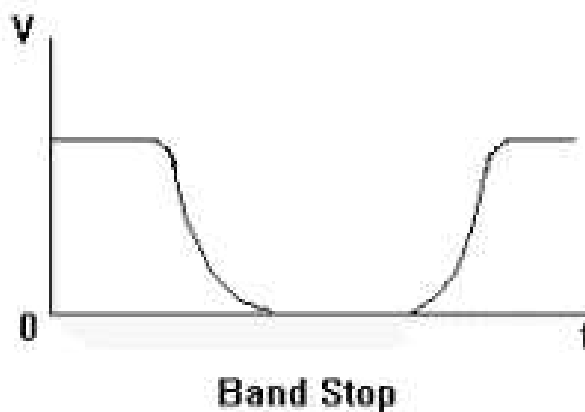
Sl. 1.3 Pojasnopropusni filter

Tehničko rješenje pojasnopropusnog filtra moguće je izraditi na dva načina. Prva varijanta podrazumijeva kombinaciju visokopropusnog i niskopropusnog filtra kao dva neovisna i zasebna filtarska elementa spojena u kaskadu, a parametri tih elemenata mogu se neovisno mijenjati. Druga varijanta podrazumijeva izradu jedinstvenog sklopa ili koda filtra određenog središnjom frekvencijom, širinom pojasa propuštanja i strminom prijelaza u područje gušenja.

1.1.4. Pojasna brana (engl. bandstop filter)

Pojasna brana je elektronički filter koji propušta samo signale izvan određenog frekvencijskog pojasa.

Pojasna brana je elektronički sklop ili uređaj, odnosno programski kod koji omogućava propuštanje signala izvan područja frekvencija određenog dvjema graničnim frekvencijama, tj. donjom i gornjom graničnom frekvencijom filtra. Kao posljedica djelovanja pojasne brane, sadržaj signala unutar područja određenog graničnim frekvencijama znatno se umanjuje ili u potpunosti uklanja iz ukupnog signala. I pojasna brana određena je pojačanjem u području propuštanja te redom filtra i faktorom dobrote Q oko središnje frekvencije filtra koja u ovom slučaju definira sredinu područja gušenja.

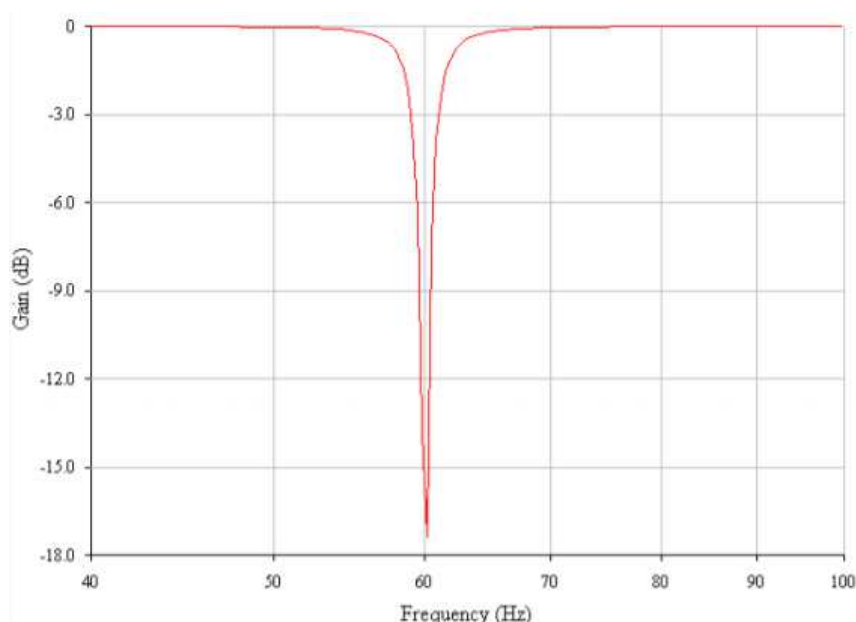


Sl. 1.4 Pojasna brana

Za potrebe audioprodukcije filteri ovog tipa glatkog su frekvencijskog odziva, no prijelaz iz područja propuštanja u područje gušenja je vrlo često strm jer se filtrom želi djelovati na točno određeno područje frekvencija u kojem treba ukloniti sadržaj signala, a sa što manje utjecaja na sadržaj signala koji ostaje za daljnju obradu. Pojačanje filtra u području propuštanja i sada obično iznosi 0 dB, iz ranije navedenih razloga.

1.1.5. Uskopojasna brana (engl. notch filter)

Uskopojasna brana je poseban tip pojasne brane čiji je osnovni zadatak izdvojiti, odnosno ukloniti smetnje u signalu koje se pojavljuju na točno određenoj frekvenciji ili više njih. Pritom je područje gušenja ovakvog filtra vrlo usko. Tipičan primjer smetnji koje pri snimanju ili obradi zvuka mogu ostati zabilježene u audiosignalu je frekvencija elektroenergetskog napajanja koja iznosi 50 ili 60 Hz, ovisno o geografskoj lokaciji, odnosno elektroenergetskom sustavu koji se na toj lokaciji primjenjuje. Osim dviju osnovnih frekvencija, kao smetnje se mogu pojaviti i njihovi harmonici, tj. komponente čije su frekvencije cjelobrojni višekratnici osnovne. Tako se smetnje nerijetko pojavljuju i na frekvencijama od 100 (120) Hz, 150 (180) Hz, 200 (240) Hz, itd.



Sl.1.5 Uskopojasna brana kojom se iz signala izdvaja frekvencija mreže od 60 Hz

1.2. Ekvalizacija

Ekvalizacija je također jedan od načina frekvencijske obrade signala. Za razliku od filtriranja, ekvalizacija nije invazivan postupak obrade signala jer je nakon postupka ekvalizacije i dalje zadržan cijeli spektar audiosignala. Cilj ekvalizacije je naglasiti ili prigušiti pojedine spektralne komponente ili dijelove spektra audiosignala. S obzirom na to da je cijeli spektar signala zadržan, učinak ekvalizatora na audiosignal je reverzibilan i može se poništiti ponovnom uporabom ekvalizatora.

Ekvalizator je jedan od alata kojima se možemo poslužiti za fino podešavanje zvuka unošenjem promjena u njegov spektralni sadržaj.

Primjerice, pri produkciji ili slušanju omiljene glazbe možda ćete primijetiti da sadržaj na niskim frekvencijama nije dovoljno prisutan. Upravo ovdje ekvalizator nalazi svoju svrhu jer njime možete prilagoditi količinu niskih frekvencija pomicanjem nekoliko kontrola ili klizača, bilo na fizički realiziranom uređaju ili u programski realiziranoj aplikaciji na zaslonu računala, pametnog telefona ili sličnih uređaja. Drugim riječima, uporabom ekvalizatora moguće je "pojačati basove" kako bi sadržaj niskih frekvencija bio naglašeniji, dajući time glazbi više ritma i energije.

Naravno, uporaba ekvalizatora nije ograničena samo na područje niskih frekvencija, već se on može primijeniti u cijelom čujnom frekvencijskom području. Primjerice, njegovom uporabom u području srednjih frekvencija moguće je mijenjati percepciju volumena vokala i instrumenata, dok je u području visokih frekvencija moguće ugađati percepciju prezentnosti i briljantnosti zvuka pojedinih izvora. Drugim riječima, ako se neki instrumenti ili vokali doimaju previše naglašenima ili nedovoljno izraženima u ukupnoj zvučnoj slici, tu je percepciju moguće prilagoditi pomoću digitalnog ekvalizatora.

Jedna od osobitosti ekvalizatora jest mogućnost istovremenog podešavanja spektralnog sadržaja audiosignala/zvuka u nekoliko određenih frekvencijskih područja. Isto tako, spektralni sadržaj u određenom frekvencijskom području moguće je prilagoditi bez utjecaja na sadržaj zvuka u preostalom dijelu čujnog područja frekvencija.

Vezano uz implementaciju ekvalizatora, arhitektura digitalnih ekvalizatora u osnovi je identična onima realiziranim analognom tehnologijom, no suvremena digitalna rješenja u obliku specijaliziranih VST dodataka uvelike nadmašuju fizičke uređaje realizirane uglavnom kao analogne uređaje, dajući time korisniku bolju kontrolu nad zvukom ili audiosignalom koji je potrebno obraditi na ovaj način. Digitalne je ekvalizatore moguće realizirati programski uz praktički bilo koji stupanj složenosti, što je s klasičnim analognim, fizički izvedenim ekvalizatorima mnogo teži zadatak, uzimajući u obzir znatno povećanje složenosti samog uređaja s povećanjem frekvencijske selektivnosti ekvalizatora. Uporabom digitalne obrade audiosignala korisniku je omogućeno fino podešavanje spektralnog sadržaja audiosignala te mu je dana velika sloboda da prilagodi zvuk prema vlastitim preferencijama.

Najčešći tipovi ekvalizatora koji se koriste za frekvencijsku obradu su grafički ekvalizator (engl. graphic equalizer), parametarski i poluparametarski ekvalizator (engl. parametric and semi-parametric equalizer) te ekvalizator s dva područja propuštanja (engl. shelving filter).

1.2.1. Grafički ekvalizator

Grafički ekvalizator je uređaj ili softverski alat koji omogućava korisniku podešavanje jačine različitih frekvencijskih pojasa audio signala. Naziva se "grafički" jer se podešavanja različitih frekvencijskih pojasa vizualno prikazuju pomoću niza kliznih potencijometara koji su raspoređeni tako da njihova pozicija stvara grafički prikaz frekvencijskog odziva. Pomicanjem potencijometra gore ili dolje, korisnik može pojačati ili prigušiti određene frekvencije kako bi postigao željeni zvučni efekt.

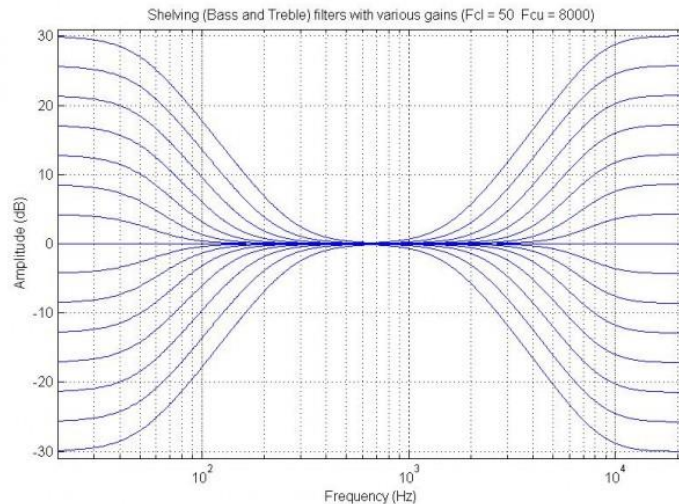


Sl.1.6 Grafički ekvalizator

1.2.2. Ekvalizator s dva područja propuštanja (engl. shelving filter)

Ekvalizator s dva područja propuštanja je osobita vrsta ekvalizatora koji zapravo predstavlja filter s dva područja propuštanja s konstantnim pojačanjima. Pritom je jedno područje propuštanja referentno u smislu pojačanja koje iznosi 0 dB, što znači da se sadržaj signala u tom frekvencijskom području ostavlja nepromijenjenim. U drugom je području propuštanja moguće regulirati pojačanje, koje pritom može biti i pozitivno i negativno, što znači da je sadržaj signala koji se nalazi unutar toga područja propuštanja moguće naglasiti, odnosno

prigušiti u odnosu na sadržaj signala koji se nalazi u referentnom području propuštanja. Granica dvaju područja propuštanja određena je graničnom frekvencijom koju je moguće namještati po volji. Strmina prijelaza iz jednog u drugo područje propuštanja ovisit će o redu filtra te se za potrebe audioprodukcije najčešće koriste filtri prvog i drugog reda.



Sl.1.7 Ekvalizator s dva područja propuštanja

Razlikujemo dvije izvedbe ovakvog ekvalizatora. Prva je ona u kojoj se područje propuštanja u kojem možemo mijenjati pojačanje nalazi ispod referentnog područja propuštanja te takvu izvedbu nazivamo engleskim terminom *low shelf* jer se njome djeluje na sadržaj signala na niskim frekvencijama. U drugoj je izvedbi područje propuštanja s promjenjivim iznosom pojačanja smješteno iznad referentnog područja propuštanja te takvu izvedbu nazivamo engleskim terminom *high shelf* jer je njome moguće djelovati na sadržaj signala na visokim frekvencijama. Za potrebe audioprodukcije koriste se obje inačice jer se njima može lagano naglasiti ili prigušiti područje niskih ili visokih frekvencija, prema potrebi, pri čemu na cijelo područje frekvencija djelujemo na jednak način jer je pojačanje konstantno.

1.2.3. Parametarski ekvalizator

U svijetu audio inženjerstva i glazbene produkcije, parametarski ekvalizator je često korišten alat za oblikovanje zvuka. Ova vrsta ekvalizatora omogućuje korisnicima preciznu kontrolu nad središnjom frekvencijom, pojačanjem i širinom pojasa. U ovom radu fokus je stavljen na upotrebu parametarskog ekvalizatora u produkciji glazbe. Njegova fleksibilnost i sposobnost prilagodbe zvuka prema potrebama čine ga neizostavnim alatom za postizanje željenog zvučnog rezultata.

Prednosti parametarskog ekvalizatora uključuju mogućnost preciznog oblikovanja zvuka vokala i glazbenih instrumenata. Pri tome se svakome izvoru zvuka naglašava za njega karakteristično područje frekvencija, a prigušuje ono u kojem zvuk samog izvora sadrži komponente koje nisu poželjne jer sadrže čujna istitravanja nastala produljenim emitiranjem zvuka iz tijela instrumenta ili neku drugu nepoželjnu karakteristiku njegovog zvuka. Ekvalizacijom zvuka različitih izvora postiže se njihova frekvencijska separacija u konačnoj stereo snimci kao dodatak prostornoj separaciji, pridonoseći tome boljoj čujnosti instrumenata i vokala u snimci. Parametarskim se ekvalizatorom mogu izolirati i prigušiti nepoželjne komponente u spektru zvuka koji je potrebno obraditi te prilagoditi zvuk pojedinih izvora (vokala i/ili instrumenata) različitim akustičkim okruženjima ili tehničko-estetskim standardima pojedinih glazbenih žanrova. Ova vrsta ekvalizatora također je korisna pri ispravljanju određenih problema sa zvukom uzrokovanih problemima vezanim uz sam prostor za snimanje.

1.2.4. Parametri parametarskog ekvalizatora

Frekvencijski odziv parametarskog ekvalizatora u njegovom uobičajenom obliku moguće je mijenjati odabirom vrijednosti triju parametara koji su identični onima definiranim za pojasnopropusni filter. Značajna razlika u odnosu na pojasnopropusni filter jest to što parametarski ekvalizator manipulira pojačanjem unutar svog radnog područja frekvencija, dok pojačanje izvan toga područja iznosi 0 dB. Drugim riječima, sadržaj zvuka unutar radnog područja prigušuje se, odnosno naglašava u odnosu na sadržaj u preostalom dijelu čujnog frekvencijskog područja. S druge strane, pojasnopropusnim filtrom propuštamo komponente zvuka unutar područja propuštanja filtra, dok sve ostale trajno uklanjamo.

Središnja frekvencija (*engl.* centre frequency) parametarskog ekvalizatora određuje određuje sredinu frekvencijskog područja koje je potrebno obraditi ekvalizatorom, tj. pojačati ili prigušiti.

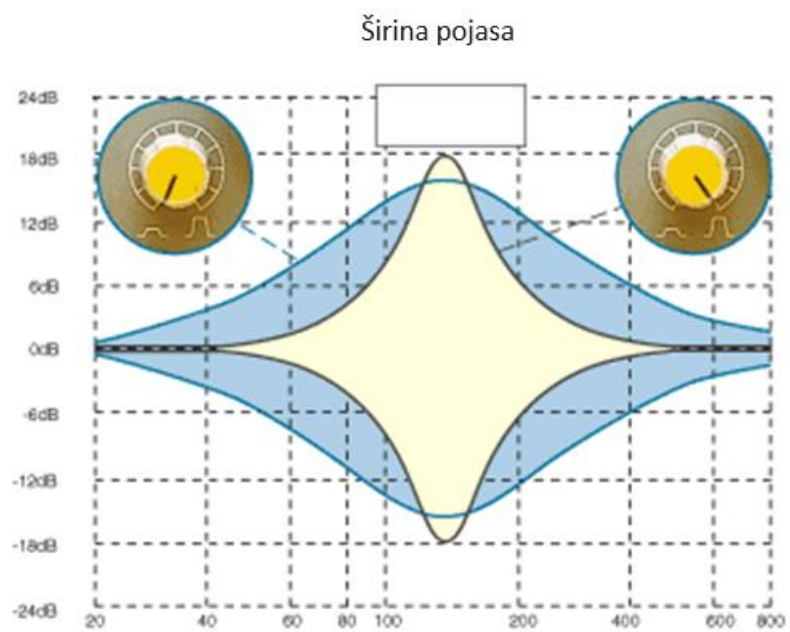
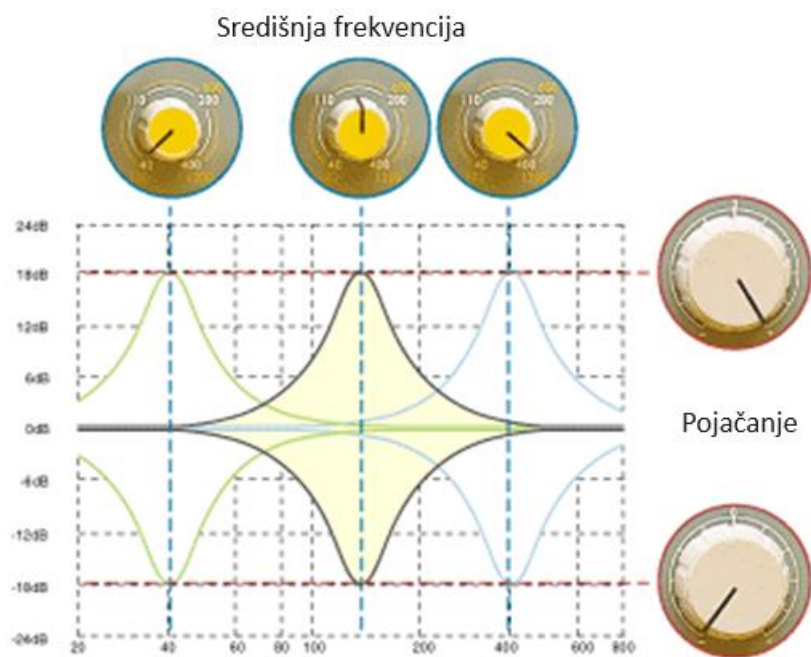
Pojačanje (*engl.* gain) određuje koliko se frekvencijski pojas koji obrađuje ekvalizator pojačava ili prigušuje. Pritom se iznos pojačanja koji se namješta odnosi na vrijednost pojačanja na središnjoj frekvenciji.

Širina pojasa (*engl.* Q factor) određuje širinu frekvencijskog područja oko središnje frekvencije unutar kojega djeluje ekvalizator. S obzirom na to da se vrijednost ovog parametra izračunava kao omjer središnje frekvencije i apsolutne širine pojasa ekvalizatora,

potrebno je naglasiti da se za manju širinu pojasa uz konstantnu središnju frekvenciju dobivaju veće vrijednosti ovog parametra. Drugim riječima, što je uže frekvencijsko područje rada ekvalizatora, to je viša brojčana vrijednost ovog parametra, što nije intuitivno. Zbog toga se često koristi i pojam rezonantnosti ekvalizatora kao intuitivniji jer veća vrijednost ovog parametra ukazuje na to da ekvalizator djeluje u užem frekvencijskom području te je time rezonantniji.

Kombinacija ovih parametara omogućuje korisnicima da precizno oblikuju zvuk prema svojim preferencijama ili zahtjevima specifičnih audio situacija. Promjenom središnje frekvencije, pojačanja i širine pojasa postiže se željeni tonalni balans, jasnoća i izražajnost zvuka koji je predstavljen ovako obrađenim audiosignalom.

U svojoj reduciranoj inačici, tehničko rješenje parametarskog ekvalizatora katkada dopušta promjenu samo nekih parametara, dok su ostali fiksno zadani. Najčešće rješenje dozvoljava promjenu središnje frekvencije i pojačanja, dok širina pojasa ima fiksnu vrijednost. Takvu inačicu parametarskog ekvalizatora nazivamo poluparametarskim ekvalizatorom. Ovakvo se tehničko rješenje često može naći na konzolama za miješanje audiosignala koje su manjih dimenzija te često nema mjesta za ugradnju potenciomentara potrebnih za kontrolu svih triju parametara ekvalizatora. Na većim uređajima te u programskim rješenjima ovo ne predstavlja nikakav problem te se redovito implementiraju parametarski ekvalizatori u svom punom obliku.



Sl.1.8 Utjecaj promjene parametara parametarskog ekvalizatora na njegovu konačnu amplitudno-frekvencijsku karakteristiku

Četveropojasni parametarski ekvalizator

Za potrebe audioprodukcije, što uključuje snimanje i naknadnu obradu zvuka, kao i događanja uživo, potrebe za frekvencijskom obradom zvuka pomoću ekvalizatora nadilaze mogućnosti koje pruža jedan parametarski ekvalizator. Zbog toga se ekvalizatorske sekcije redovito sastoje od nekoliko parametarskih ekvalizatora, kako na fizičkim uređajima kao što su konzole za miješanje, tako i u programskim rješenjima kao što su VST dodaci. Dok na fizičkim uređajima ozbiljno ograničenje predstavlja prostor potreban za montažu potencijometara kojima se regulira rad ekvalizatora, u programskim je rješenjima jedino ograničenje zahtjev na procesorsku snagu uređaja na kojem se izvodi aplikacija koja sadrži programsko rješenje ekvalizatora. Upravo zbog toga programska rješenja ekvalizatora nude mnogo raznovrsnije mogućnosti obrade signala nego njihovi elektronički pandani. Stoga i tematika ovog rada obuhvaća programsku implementaciju parametarskog ekvalizatora.

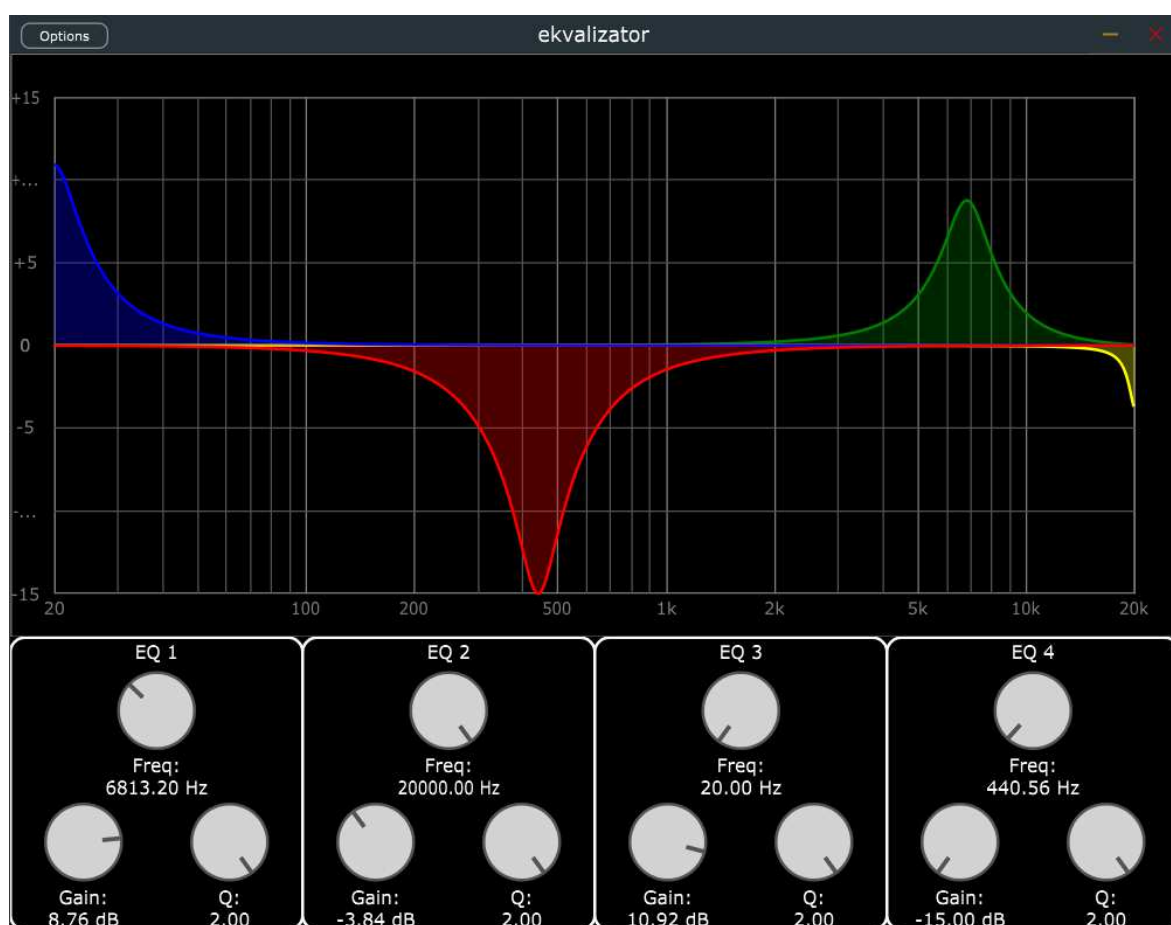
Na slici 1.9 prikazan je parametarski ekvalizator izveden za potrebe ovog završnog rada u obliku VST dodataka radi primjene u digitalnim radnim stanicama (*engl.* digital audio workstation - DAW). tj. programima za snimanje i obradu zvuka kao što su Cubase, Reaper i sl.

Radi ilustracije mogućnosti koje pruža ekvalizatorska sekcija sastavljena od više parametarskih ekvalizatora, ekvalizator implementiran u ovom radu sastavljen je od četiri neovisna parametarska ekvalizatora.

Svakome od njih moguće je neovisno namjestiti središnju frekvenciju, pojačanje i širinu pojasa. Središnju frekvenciju ekvalizatora moguće je namjestiti na bilo koju vrijednost unutar frekvencijskog područja čujnog zvuka, tj. od 20 Hz do 20000 Hz. Pojačanje se na svakom od četiriju ekvalizatora može mijenjati u rasponu od -15 dB do +15 dB. Širina pojasa Q mijenja se u rasponu od 0,1 do 2. Kontrola svih parametara izvedena je emulacijom rotacijskih potencijometara koje nalazimo na fizičkim uređajima, oponašajući time upravo takvu, sklopovsku izvedbu ekvalizatora.

Ono što vrlo često nedostaje na fizičkim uređajima, osobito analognim, a nezaobilazno je u programskim rješenjima ekvalizatora jest prikaz ukupne amplitudno-frekvencijske karakteristike četveropojasnog ekvalizatora, ali i amplitudno-frekvencijskih karakteristika svakoga od četiriju ekvalizatora kao njegovih sastavnih dijelova. Na osi apscisa ovoga prikaza nalazi se frekvencija kao nezavisna veličina, dok je na osi ordinata prikazano

pojaćanje kao zavisna veliĉina i rezultat namještanja, odnosno izbora vrijednosti parametara svakog od ĉetiriju ekvalizatora. Ovakav je prikaz od nemjerljive koristi svakom korisniku koji tek poćinje raditi u podruĉju produkcije zvuka jer je vrlo jasno vidljivo na koji naćin ekvalizator djeluje na audiosignal u smislu pojaćavanja (naglašavanja) ili utišavanja (prigušivanja) pojedinih frekvencijskih komponenata u audiosignalu. Bez ovakvog prikaza potrebno je veliko iskustvo stećeno kroz godine usavršavanja kako bi se samo iz poloŹaja rotacijskih potencijometara moglo procijeniti djelovanje ovakvog ekvalizatora na audiosignal koji se obraćuje.



Sl. 1.9 Ĉetveropojasni parametarski ekvalizator

Programski kod za izvedbu četveropojasnog parametarskog ekvalizatora

Za programsku izvedbu četveropojasnog parametarskog ekvalizatora koristili smo programski jezik C++ u okviru JUCE-a (JUCE C++ Framework). JUCE pruža moćne alate za razvoj audio aplikacija, uključujući različite komponente za obradu zvuka. Implementacija je obuhvatila definiranje klasa i funkcija za kontrolu frekvencije, pojačanja i propusnosti pojasa, kao i za grafičko sučelje za korisnike. Korištenjem JUCE-ovih funkcionalnosti za digitalnu obradu signala, postigli smo visoku stabilnost i efikasnost u radu, osiguravajući istovremeno visoku kvalitetu zvuka i fleksibilnost prilagodbe parametara ekvalizatora.

Svakom dijelu koda pridružiti ćemo osnovni pregled i objašnjenje. Radi jednostavnosti, fokusirat ćemo se na strukturu i osnovne funkcije, a detaljnije informacije i dokumentacija bit će dostupne u prilogu rada.

1.3. Inicijalizacija EQ filtera

U funkciji *initFilters* inicijaliziraju se filteri EQ-a. Za svaki od četiri frekvencijska opsega, stvaraju se koeficijenti filtra koristeći funkciju *dsp::IIR::Coefficients<float>::makePeakFilter*.

```
void ekvalizatorAudioProcessor::initFilters()
{
    *processChain.template get<Mid1FilterIndex>().state =
    *dsp::IIR::Coefficients<float>::makePeakFilter(sampleRate,
    mid1Freq, mid1Q, mid1Gain);
    *processChain.template get<Mid2FilterIndex>().state =
    *dsp::IIR::Coefficients<float>::makePeakFilter(sampleRate,
    mid2Freq, mid2Q, mid2Gain);
    *processChain.template get<Mid3FilterIndex>().state =
    *dsp::IIR::Coefficients<float>::makePeakFilter(sampleRate,
    mid3Freq, mid3Q, mid3Gain);
    *processChain.template get<Mid4FilterIndex>().state =
    *dsp::IIR::Coefficients<float>::makePeakFilter(sampleRate,
    mid4Freq, mid4Q, mid4Gain);
}
```

1.4. Obrada promjena parametara

Ove funkcije dio su audio procesora koji implementira ekvalizator. Svaka funkcija obrađuje promjenu određenog parametra ekvalizatora (središnja frekvencija, pojačanje, širina pojasa) za određeni pojas. Kada se promijeni neki od parametara, funkcija izračunava nove koeficijente filtra i primjenjuje ih na odgovarajući audio kanal kako bi se pravilno izvršila ekvalizacija zvuka. Ovaj proces omogućuje dinamičko prilagođavanje karakteristika zvuka prema postavljenim parametrima.

```
void ekvalizatorAudioProcessor::onMidlGainChanged(float
newValue)
{
DBG("change midl gain: " << newValue);
midlGain = Decibels::decibelsToGain(newValue);
*processChain.template get<MidlFilterIndex>().state =
*dsp::IIR::Coefficients<float>::makePeakFilter(sampleRate,
midlFreq, midlQ, midlGain);
}

void ekvalizatorAudioProcessor::onMidlQChanged(float
newValue)
{
DBG("change midl Q: " << newValue);
midlQ = newValue;
*processChain.template get<MidlFilterIndex>().state =
*dsp::IIR::Coefficients<float>::makePeakFilter(sampleRate,
midlFreq, midlQ, midlGain);
}

void ekvalizatorAudioProcessor::onMidlFreqChanged(float
newValue)
{
DBG("change midl freq: " << newValue);
midlFreq = newValue;
*processChain.template get<MidlFilterIndex>().state =
*dsp::IIR::Coefficients<float>::makePeakFilter(sampleRate,
midlFreq, midlQ, midlGain);
}
```

1.5. Prikaz frekvencijskog odziva ekvalizatora

Ovaj dio koda namijenjen je iscrtavanju, odnosno prikazu amplitudno-frekvencijske karakteristike četiriju parametarskih ekvalizatora koji zajedno čine četveropojasni ekvalizator. Za svaku frekvenciju kao koordinatu na osi apscisa izračunava se pojačanje u decibelima kao koordinata na osi ordinata za svaki od četiriju ekvalizatora uporabom funkcije `mapFrequencyToYCoordinate`. Ovisno o frekvenciji, dodaju se točke na odgovarajuće putanje (`mid1Path`, `mid2Path`, `mid3Path`, `mid4Path`).

Zatim se pomoću funkcije `createPathToFill` kreiraju zatvorene putanje koje se koriste za ispunu područja ispod izračunanih amplitudno-frekvencijskih karakteristika. Na kraju, svaka amplitudno-frekvencijska karakteristika iscrtava se na grafu odgovarajućom bojom, koristeći funkciju `strokeAndFillPath` koja istovremeno crta obrub i ispunjava područje ispod krivulje s prozirnošću od 30%. Boje koje se koriste su zelena za `mid1Path`, žuta za `mid2Path`, plava za `mid3Path` i crvena za `mid4Path`.

```
Path mid1Path;
Path mid2Path;
Path mid3Path;
Path mid4Path;

for(auto x = left; x < right; ++x)
{
    const float freq = minFreq * std::pow((maxFreq /
minFreq), ((x - left) / static_cast<float>(width)));

    auto mid1Y = mapFrequencyToYCoordinate(freq,
mid1FilterCoeffs);
    auto mid2Y = mapFrequencyToYCoordinate(freq,
mid2FilterCoeffs);
    auto mid3Y = mapFrequencyToYCoordinate(freq,
mid3FilterCoeffs);
    auto mid4Y = mapFrequencyToYCoordinate(freq,
mid4FilterCoeffs);

    if(x == left)
    {
```

```

        mid1Path.startNewSubPath(x, mid1Y);
        mid2Path.startNewSubPath(x, mid2Y);
        mid3Path.startNewSubPath(x, mid3Y);
        mid4Path.startNewSubPath(x, mid4Y);
    }
    else
    {
        mid1Path.lineTo(x, mid1Y);
        mid2Path.lineTo(x, mid2Y);
        mid3Path.lineTo(x, mid3Y);
        mid4Path.lineTo(x, mid4Y);
    }
}

const auto middle = top + height / 2.f;

auto createPathToFill = [left, middle, right](const auto&
path) {
    Path pathToFill{ path };
    pathToFill.lineTo(right, middle);
    pathToFill.lineTo(left, middle);
    pathToFill.closeSubPath();
    return pathToFill;
};

auto mid1PathToFill = createPathToFill(mid1Path);
auto mid2PathToFill = createPathToFill(mid2Path);
auto mid3PathToFill = createPathToFill(mid3Path);
auto mid4PathToFill = createPathToFill(mid4Path);

auto strokeAndFillPath = [&g](const auto& path, const auto&
pathToFill, auto colour) {
    const auto strokeType = PathStrokeType{ 2.f };
    constexpr auto Opacity = 0.3f;

    g.setColour(colour);
    g.strokePath(path, strokeType);
    g.setOpacity(Opacity);
    g.fillPath(pathToFill);
};

```

```
strokeAndFillPath(mid1Path, mid1PathToFill, Colours::green);
strokeAndFillPath(mid2Path, mid2PathToFill, Colours::yellow);
strokeAndFillPath(mid3Path, mid3PathToFill, Colours::blue);
strokeAndFillPath(mid4Path, mid4PathToFill, Colours::red);
```

Kod 1.3 – Crtanje amplitudno-frekvencijskih karakteristika filtara

1.6. Definiranje raspona i inicijalnih vrijednosti parametara ekvalizatora

Ovaj dio koda definira raspon i inicijalne (default) vrijednosti parametara ekvalizatora. *MidFreqRange*, *GainRange* i *QRange* predstavljaju raspon vrijednosti koje odgovarajući parametri središnje frekvencije, pojačanja i širine pojasa mogu imati, dok *MidFreqDefault*, *GainDefault* i *QDefault* predstavljaju inicijalne vrijednosti koje će se koristiti pri pokretanju koda sve dok korisnik ne promijeni postavke. Konkretno, *MidFreqRange* definira raspon dopuštenih središnjih frekvencija od 20 Hz do 20 kHz. *GainRange* definira raspon dopuštenih pojačanja od -15 dB do +15 dB, a *QRange* definira raspon dopuštenih faktora dobrote Q kao mjere širine pojasa od 0.1 do 2.

```
static const Range<float> MidFreqRange{20.f, 20000.f};
static const Range<float> GainRange{-15.f, 15.f};
static const Range<float> QRange{0.1f, 2.f};

static const float MidFreqDefault{1000.f};
static const float GainDefault{ 0 };
static const float QDefault{ std::sqrt(2.f) };
```

Kod 1.4 – Definiranje raspona dopuštenih vrijednosti parametara ekvalizatora te inicijalnih vrijednosti tih parametara

1.7. Kreiranje korisničkog sučelja za kontrolu rada i izbor vrijednosti parametara četveropojasnog ekvalizatora

Ovaj dio koda implementira funkciju *buildControls*, koja postavlja kontrole za ekvalizator (EQ) bend. Funkcija inicijalizira i prikazuje tri klizača (središnju frekvenciju, pojačanje i faktor dobrote Q) te im postavlja odgovarajući izgled pomoću metode *setLookAndFeel*. Klizači su realizirani u stilu *RotaryVerticalDrag* te su im dodani odgovarajući tekstualni

sufiksi u obliku mjernih jedinica ("dB" za pojačanje i "Hz" za središnju frekvenciju) kako bi se korisniku olakšalo razumijevanje funkcije svakog klizača.

Ovisno o tipu EQ benda (Mid1, Mid2, Mid3 ili Mid4), funkcija postavlja odgovarajuće identifikatore za pojačanje, faktor dobrote Q i središnju frekvenciju. To se postiže naredbom *switch*, gdje se za svaki tip postavljaju specifični tekstovi i identifikatori parametara iz *EqParameters* prostora imena. Na primjer, za tip Mid1, funkcija postavlja tekst "EQ 1" i povezuje identifikatore *Mid1GainId*, *Mid1QId* i *Mid1FreqId*.

Nakon postavljanja identifikatora, funkcija stvara *SliderAttachment* objekte za svaki klizač. Ovi objekti povezuju klizače s odgovarajućim parametrima u *AudioProcessorValueTreeState* objektu, omogućujući da promjene na klizačima izravno utječu na parametre ekvalizatora u stvarnom vremenu. To znači da kada korisnik promijeni vrijednost klizača, ta se promjena automatski reflektira u internim parametrima procesora zvuka, osiguravajući sinkronizaciju korisničkog sučelja i audio procesa.

Također, funkcija postavlja izgled i osjećaj klizača pomoću *customLookAndFeel* objekta, koji omogućuje prilagodbu vizualnog izgleda klizača, čineći korisničko sučelje estetski privlačnijim i dosljednijim. Na kraju, funkcija osigurava da su svi elementi kontrole vidljivi na korisničkom sučelju pomoću metode *addAndMakeVisible*.

```
void EqBand::buildControls()
{
    eqBandLabel.setJustificationType(Justification::centred);

    addAndMakeVisible(eqBandLabel);

    initAndPublishControl(gainKnob,
Slider::SliderStyle::RotaryVerticalDrag, " dB");
    initAndPublishControl(qKnob,
Slider::SliderStyle::RotaryVerticalDrag, "");
    initAndPublishControl(freqKnob,
Slider::SliderStyle::RotaryVerticalDrag, " Hz");

    gainKnob.setLookAndFeel(&customLookAndFeel);
    qKnob.setLookAndFeel(&customLookAndFeel);
    freqKnob.setLookAndFeel(&customLookAndFeel);

    const String* gainId;
    const String* qId;
```

```

const String* freqId;

switch (type)
{
case Type::Mid1:
{
    eqBandLabel.setText("EQ 1",
NotificationType::dontSendNotification);
    gainId = &EqParameters::Mid1GainId;
    qId = &EqParameters::Mid1QId;
    freqId = &EqParameters::Mid1FreqId;
    break;
}
case Type::Mid2:
{
    eqBandLabel.setText("EQ 2",
NotificationType::dontSendNotification);
    gainId = &EqParameters::Mid2GainId;
    qId = &EqParameters::Mid2QId;
    freqId = &EqParameters::Mid2FreqId;
    break;
}
case Type::Mid3:
{
    eqBandLabel.setText("EQ 3",
NotificationType::dontSendNotification);
    gainId = &EqParameters::Mid3GainId;
    qId = &EqParameters::Mid3QId;
    freqId = &EqParameters::Mid3FreqId;
    break;
}
case Type::Mid4:
{
    eqBandLabel.setText("EQ 4",
NotificationType::dontSendNotification);
    gainId = &EqParameters::Mid4GainId;
    qId = &EqParameters::Mid4QId;
    freqId = &EqParameters::Mid4FreqId;
    break;
}
}

```

```

        gainAttachment =
std::make_unique<AudioProcessorValueTreeState::SliderAttachme
nt>(
        parameters, *gainId, gainKnob);
        qAttachment =
std::make_unique<AudioProcessorValueTreeState::SliderAttachme
nt>(
        parameters, *qId, qKnob);
        freqAttachment =
std::make_unique<AudioProcessorValueTreeState::SliderAttachme
nt>(
        parameters, *freqId, freqKnob);
}

```

Kod 1.5 – Kreiranje korisničkog sučelja za za kontrolu rada i izbor vrijednosti parametara četveropojasnog ekvalizatora

Zaključak

U ovom istraživanju, implementirali smo ekvalizator koristeći okvir Waveform 13 i testirali njegovu funkcionalnost kroz praktičnu upotrebu. Naša analiza pokazuje da se amplitudno-frekvencijska karakteristika dizajniranog četveropojasnog ekvalizatora uspješno i korektno oblikuje na temelju namještenih vrijednosti parametara svih četiriju ekvalizatora, čime se na željeni način mijenja i frekvencijski sadržaj audiosignala. Ovi rezultati pružaju korisne uvide u funkcionalnost i upotrebljivost našeg ekvalizatora u stvarnim aplikacijama, potvrđujući njegovu valjanost kao alata za obradu zvuka.

Literatura

- [1] Icon Collective. *Types of EQ*. Poveznica: <https://www.iconcollective.edu/types-of-eq>; pristupljeno 12. svibnja 2024.
- [2] Ethan Keeley, *Parametric EQ*, MasteringBOX, (2018, srpanj). Poveznica: <https://www.masteringbox.com/learn/parametric-eq>; pristupljeno 15. svibnja 2024.
- [3] Kieran Whitehouse, *Different Types of EQ*, ProducerHive, (2021, ožujak). Poveznica: <https://producerhive.com/ask-the-hive/different-types-of-eq/>; pristupljeno 15. svibnja 2024.
- [4] Horvat, M. Frekvencijska i vremenska obrada signala, 2023.

Sažetak

Ovaj rad istražuje dizajn, implementaciju i evaluaciju parametarskog ekvalizatora čiji je frekvencijski odziv moguće mijenjati promjenom triju parametara: središnje frekvencije (engl. centre frequency), pojačanja (engl. gain) i širine pojasa propuštanja (engl. bandwidth). Namještanjem ovih parametara korisnik može fino ugoditi odziv jednog ili više filtara koji čine parametarski ekvalizator, mijenjajući time spektralni sadržaj audiosignala unutar određenog frekvencijskog područja radi poboljšanja kvalitete zvuka predstavljenog tim audiosignalom.

U teorijskom dijelu rada obrađeni su osnovni koncepti frekvencijske obrade audiosignala, što uključuje prikaz osnovnih karakteristika i parametara standardnih tipova filtara koji se koriste pri filtriranju audiosignala, kao i osnovnih karakteristika standardnih tipova ekvalizatora. Naglasak je stavljen upravo na parametarski ekvalizator i parametre koje je moguće mijenjati radi frekvencijske obrade audio signala.

U drugom je dijelu rada opisana praktična izvedba parametarskog ekvalizatora u obliku VST dodatka temeljena na JUCE okviru te je detaljno opisana njegova struktura, način implementacije i specifikacije.

Summary

This paper investigates the design, implementation, and evaluation of a parametric equalizer that allows users to adjust its frequency response by modifying three parameters: center frequency, gain, and bandwidth. The focus is on how these parameters can be manipulated to fine-tune the response of individual filters within the equalizer, thereby enhancing the spectral content of audio signals within specific frequency ranges to improve sound quality. Additionally, the paper covers fundamental concepts of audio signal frequency processing, including the characteristics and parameters of standard filter types and equalizers. The practical aspect of the study involves implementing the parametric equalizer as a VST plugin within the JUCE framework, with an overview of its functionality provided.