

SOFTVERSKI ALAT ZA USKOPOJASNU ANALIZU IMPULSNOG ODZIVA – UPA A SOFTWARE TOOL FOR NARROW-BAND ANALYSIS OF IMPULSE RESPONSE - UPA

Natalija Vugdelija, *Visoka škola strukovnih studija za informacione i komunikacione tehnologije, Beograd,*

Sadržaj - U ovom radu prikazan je jedan softverski alat za uskopojasnu analizu impulsnog odziva. Ovaj alat služi pre svega kao pomoć u rešavanju akustičkih problema u malim prostorijama, odnosno studijima. U uvodnom delu pomenuti su razlozi za kreiranje novog softverskog alata, a zatim je prikazan način rada program za uskopojasnu analizu UPA, načinjenog u programskom paketu MatLab. Date su osnovne karakteristike i mogućnosti pomenutog programa. Objasnjeno je kako program na proizvoljno malim frekvencijskim opsezima izračunava vreme reverberacije, odstupanje i prikazuje slap za željeni frekvencijski opseg. Opisani su problemi koji su postojali pri realizaciji programa UPA i način na koji su prevaziđeni. Na kraju su prikazani rezultati testiranja softverskog alata UPA, dobijeni primenom sintetisanih impulsnih odziva.

Abstract - In this paper a software tool for narrow-band analysis of impulse response is presented. The tool helps solving acoustic problems in small rooms (music studios). First, reasons for creating new software tool are mentioned, and then the MatLab program UPA for narrow-band analysis is presented. Basic characteristics and features of the program are described. It is explained how the program on arbitrarily small frequency bands calculates the reverberation time, deviations and displays waterfall for chosen frequency intervals. A couple of implementation difficulties are described, together with their solutions. At the end, some results are presented. The results are obtained by applying the program UPA on software made impulse responses.

1. UVOD

Male prostorije, poput muzičkih studija, imaju vrlo specifične akustičke probleme. Najznačajniji uzroci akustičkih izobličenja, tipičnih za male prostorije su: rezonance prostorije i comb filter. Ovi efekti za posledicu imaju pojačanja, odnosno slabljenja intenziteta zvuka, u pojedinim tačkama u posmatranoj prostoriji, u odnosu na neku srednju vrednost.

Obe navedene pojave dovode do toga da se na pojedinim frekvencijama javljaju maksimumi energije. U praksi bi bilo korisno kada bi postojao alat koji bi mogao objektivno da detektuje akustička izobličenja i da ukaže na problematične frekvencije. Ovakav alat mogao bi da pomogne stručnjaku koji inače detektuje razne akustičke probleme uhom.

Softverski alat UPA napravljen je namenski za analizu impulsnog odziva ali u proizvoljnom frekvencijskom opsegu koji se može zadati. Osnovna namena ovog alata je uskopojasna analiza, jer postojeći alati za analizu impulsnog odziva po oktavama i tercama ne mogu istaći problematične frekvencije zbog toga što dolazi do usrednjavanja vrednosti. Ovaj softverski alat opisan je u [1].

Konkretan problem pojavio se u pojedinim studijima u kojima je moguće čuti izvesne zvučne defekte, ali oni nisu mogli biti uočeni dosadašnjom analizom impulsnog odziva.

2. PREDLOŽENO REŠENJE

Pomenuti problemi doveli su do potrebe za razvojem softverskog alata koji bi omogućio uskopojasnu analizu impulsnog odziva. Ideja je da tako načinjen softverski alat omogući računanje i prikaz vremena reverberacije i slapa koristeći znatno uže, a potencijalno problematične frekvencijske opsege. To bi pomoglo da se uoče neke

nepravilnosti koje u dosadašnjim analizama nisu bile vidljive, a mogle su da se čuju.

Na osnovu ove ideje napravljen je softverski alat UPA (UskoPojasna Analiza), koji omogućava posmatranje proizvoljno uskog frekvencijskog opsega. Primenom ovog alata moguće je izdvojiti frekvencije koje su eventualno problematične. Program je načinjen u softverskom paketu MatLab. On omogućava prikaz slapa i vremena reverberacije po oktavama i tercama (radi poređenja sa drugim softverima), ali i po uskim frekventnim pojasima fiksne širine u Hercima, što mu je i osnovna prednost.

Softverski alat UPA može da vrši analizu impulsnog odziva, šuma ili nekog veštački generisanog signala. Postoji mogućnost prikazivanja:

- Spektra signala
- Vremena reverberacije, po proizvoljno uzanim frekvencijskim opsezima, ali i po oktavama i tercama
- Slapa signala, po proizvoljno uzanim frekvencijskim opsezima, ali i po oktavama i tercama
- Odstupanja signala od linearne aproksimacije, po proizvoljno uzanim frekvencijskim opsezima, ali i po oktavama i tercama
- Pada nivoa signala za pojedinačne frekvencijske komponente

Softverski alat za uskopojasnu analizu UPA može da se koristi u svrhu detekcije rezonantnih frekvencija u nekoj prostoriji. Da bi detekcija rezonantnih frekvencija bila što pouzdanija korišćeni su različiti parametri kao i njihovo međusobno poređenje. U tu svrhu uveden je novi parametar koji se računa pri analizi impulsnog odziva, a to je odstupanje. Računa se odstupanje krive pada nivoa signala u vremenu od aproksimirane linije pada na osnovu koje se

računa vreme reverberacije. Ideja da se računa odstupanje javila se posmatranjem krivih pada na pojedinačnim frekvencijama. Uočeno je da neke krive pada više osciluju oko aproksimirane linije pada na osnovu koje se računa vreme reverberacije, a neke značajno manje. Pokazalo se da je na rezonantnim frekvencijama, kada jedna frekvencija dominira svojim intenzitetom, odstupanje mnogo manje.

3. OPIS ALGORITMA

U cilju što kvalitetnije analize uvedena je i prozorska funkcija pre FFT funkcije. Korišćene su sledeće prozorske funkcije: Hamming, Hann, Blackman, Kaiser i Tukeywin, a najbolje su se pokazale Hamming i Tukeywin prozorske funkcije.

Primenom FFT na malom delu impulsnog odziva dobija se spektar signala na kratkom vremenskom intervalu. Pomeranjem vremenskog prozora dobijamo promenu spektra u vremenu. Rezultat je predstavljen matricom Y, u kojoj svaki red predstavlja promenu jedne komponente spektra tokom vremena, a svaka kolona predstavlja spektar u određenom trenutku vremena. Analizom pojedinačnih redova matrice, može se odrediti vreme reverberacije Trev na odgovarajućim frekvencijama, odnosno uskim frekvencijskim opsezima oko tih frekvencija. Matrica u celini može se iskoristiti za prikazivanje slapa ili njegovog dela koji je od značaja.

Algoritam dobijanja pomenute matrice Y u osnovnim crtama teče ovako:

- Iz wav fajla formira se realan niz A koji predstavlja impulsni odziv. Definiše se frekvencija odmeravanja f_s , koja standardno iznosi 44.1 KHz.
- Korisnik ovog alata može da zadaje dužinu okvira (DO) nad kojim se vrši FFT, popunjenost okvira podacima tj. broj odmeraka u okviru (BO) i preklapanje okvira tj. pomak okvira (P). Zadavanjem dužine okvira definiše se rezolucija odnosno širina posmatranog frekvencijskog opsega. tako da je ispunjen uslov $1 \leq P \leq BO \leq DO$.
- Na osnovu ovih parametara određuju se:
 - Širina frekventnih pojasa po kojima se vrši analiza, tj. rezolucija spektra $Fr = Fs/DO$;
 - Vremenski korak $t = P/Fs$;
 - Preklapanje $Pr = 1 - P/DO$
 - Popunjenost okvira $PP = BO/DO$;

Pretpostavimo da su zadate vrednosti: $DO = 4410$, $BO = P = 441$.

Za ovako zadate vrednosti dobija se: $Fr = 10\text{Hz}$, $t = 0.01\text{s}$, $Pr = 0.9$ ili $Pr = 90\%$, $PP = 0.1$ ili $PP = 10\%$.

- Nad nizom A se postavlja okvir X, čiji je prvi deo dužine BO popunjen podacima iz A, a ostatak je popunjen nulama.
- Izračunava se kolona matrice Y kao FFT(X)
- Okvir X se pomera za P i ponavlja se prethodni korak dok se ne dođe do kraja niza A.

- Nakon formiranja matrice Y, radi određivanja veličina Trev i odstupanja na pojedinim frekvencijama, za svaku njenu vrstu se logaritmovana kriva nivoa zvuka aproksimira pravom linijom, a dobijena prava se koristi za određivanje Trev i odstupanja.

4. NEKE KARAKTERISTIKE IMPLEMENTACIJE

Automatsko određivanje kraja pada: Kako se koriste vrlo uzani frekvencijski opsezi (u našem slučaju to može biti reda Herca), bilo bi neudobno za rad da se radi računanja Trev na svakoj frekvenciji kraj pada, odnosno dostizanje nivoa šuma, određuje ručno. Stoga je u program UPA ugrađeno automatsko određivanje kraja pada, što je vrlo suptilan zadatak. Greška pri određivanju kraja pada dovodi do pogrešno određenog Trev, zbog čega program može pogrešno signalizirati pojedine frekvencije kao problematične. U takvim situacijama moguće je kraj pada zadati ručno (vizuelno se lako dobija dovoljno tačna vrednost) i tako otkloniti pomenuti nedostatak. Da bi se i ova neudobnost svela na minimum, posebna pažnja je posvećena kriterijumu za automatsko prepoznavanje kraja pada.

Formula za računanje Trev: U malim prostorijama pad najčešće nije dovoljno dug da bi se definicija primenila direktno (potrebno je da nivo padne za 60dB). Za takve slučajeve u upotrebi je nekoliko standardnih formula za određivanje Trev. One se uglavnom oslanjaju na grafik promena nivoa za datu frekvenciju ili frekventni opseg. Neke od formula su prilagođene brzom usmenom računanju (npr. očitavanje vremena tokom kojeg nivo zvuka pada za 20 ili 30dB), a neki automatskom računanju bez dodatnih informacija o trajanju ili visini pada (npr. linearna regresija na prvih 160ms). U slučaju kada je moguće kvalitetno automatski odrediti kraj pada, za očekivati je da aproksimacija pravom linijom da tačniju sliku nego bilo koja formula sa unapred postavljenim granicama, bilo po visini pada, bilo po njegovom trajanju.

5. ODREĐIVANJE APROKSIMACIJE KRIVE PADA I ODSUPANJA

Neka je J intenzitet zvuka, a L nivo zvuka, pri čemu važe formule:

$$L = 20 \cdot \log_{10}(J),$$

$$J = 10^{L/20} \quad (1)$$

Na posmatranom vremenskom intervalu grubo razlikujemo zonu pada i zonu šuma. U zoni pada, nivo zvuka opada približno linearno, dok je u zoni šuma nivo zvuka približno konstantan. Da bi se uvela mera odstupanja krive nivoa zvuka od linearnog oblika, potrebno je najpre da se ta kriva aproksimira pravom linijom. Prilikom aproksimacije nivoa zvuka pravom linijom obično se koristi metoda linearne regresije, koja daje pravu liniju sa najmanjim kvadratnim odstupanjem od date krive. Međutim, prilikom primene ove metode u njenom standardnom obliku, javljaju se dva problema: automatski izbor intervala na kome se vrši linearna regresija i problem niskih intenziteta zvuka. Ovi problemi, kao i načini prevazilaženja detaljnije su opisani u narednim pasusima.

Prilikom vizuelnog posmatranja krive pada nivoa zvuka, često je jednostavno prepoznati vremenski interval u kome nivo zvuka opada približno linearno, ali automatsko određivanje ovog intervala nije lak zadatak. Kada se uzme u obzir da zbog raznih anomalija granice intervala ni vizuelno nije uvek lako odrediti, automatsko određivanje granica postaje utoliko teže. Naime, zbog prelaznih pojava za pojedine frekvencije treba isključiti iz razmatranja neki mali interval na početku posmatranog vremenskog perioda, a postoje i teškoće u određivanju kraja zone pada. Problemi određivanja tačnog intervala za primenu linearne regresije se mogu prevazići na sledeći način: koeficijenti A i B, koji određuju najpribližniju pravu liniju $L' = At+B$ izračunaju se za veliki broj intervala, a zatim se kao konačan linearni koeficijent A uzima medijalna vrednost (srednja po veličini) od svih dobijenih. Ovakav izbor koeficijenta A je bolji nego računanje srednje vrednosti (aritmetičke sredine) svih koeficijenata, jer na pojedinim intervalima dobijene vrednosti A mogu vrlo značajno odstupati od željene, dok je za veliki broj intervala vrednost A bliska onoj koju želimo da dobijemo kao konačnu.

Drugi pomenuti problem odnosi se na situaciju kada je intenzitet zvuka vrlo nizak. U tom slučaju mali pad intenziteta se na logaritmovanoj krivoj (krivoj pada) vidi kao veliki pad, tj. kao negativan pik. Zbog toga određivanje slobodnog koeficijenta B na krivoj L nivoa zvuka može biti manje tačno, odnosno može dovesti do pomeranja pravolinijske aproksimacije niže nego što bi bilo realno. Ovde je koeficijent B određen na krivoj J intenziteta zvuka, tako da eksponencijalna kriva J' koja odgovara linearnoj funkciji L' (kao u formulama 1), ima najmanje kvadratno odstupanje od stvarne krive intenziteta J.

Konačno, nakon što su određeni koeficijenti A i B, potrebno je odrediti meru odstupanja krive pada od njene aproksimacije. To se može učiniti bilo u eksponencijalnom domenu, poredeći intenzitet zvuka J sa eksponencijalnom funkcijom J' , ili u linearnom domenu, poredeći nivo zvuka L sa linearnom funkcijom L' . Zbog negativnih pikova koji se javljaju na krivoj nivoa zvuka, umesto računanja apsolutne greške u linearnom domenu, računata je relativna greška u eksponencijalnom domenu. Kao konačna mera odstupanja uzet je logaritam zbira kvadrata relativnih grešaka u intervalu od početka posmatranog perioda do trenutka u kome aproksimacija dostiže nivo šuma.

6. DOBIJENI REZULTATI

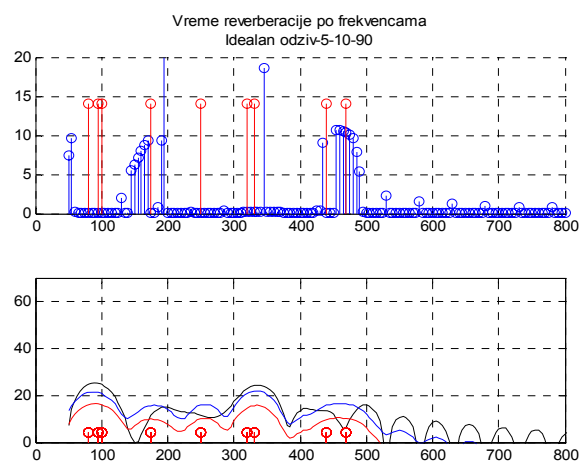
Jasno je da se male rezolucije mogu dobiti ili malom popunjenošću okvira, odnosno dodavanjem većeg broja nula ili velikim preklapanjem. Oba načina unose degradaciju kvaliteta analize impulsnog odziva, pa je neophodno analizirati koje ulazne vrednosti daju najbolje rezultate.

Analize su rađene na veštački generisanim idealnim impulsnim odzivima, a u ovom radu prikazana je analiza impulsnog odziva koji sadrži komponente na 80, 95, 100, 175, 250, 320, 330, 440, 470Hz. Idealni signal napravljen je tako da sve komponente imaju isti koeficijent opadanja, a amplitude su takođe konstantne za sve komponente osim za dve, na 80 i na 330Hz koje imaju duplo veći intenzitet od ostalih komponenti. Uzete su samo dve komponente sa duplo

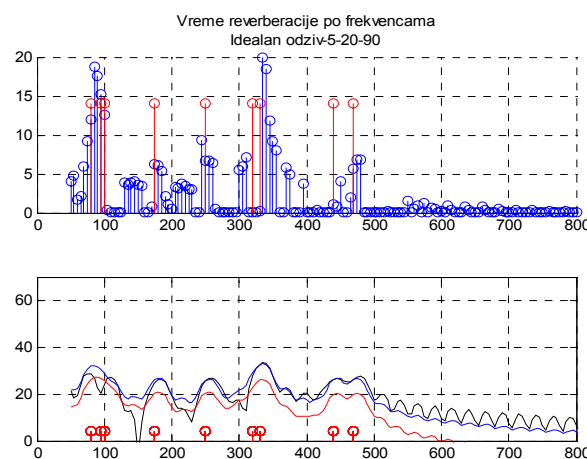
većim vrednostima amplitude od ostalih komponenta, da bi se proverilo sa kojim parametrima softverski alat UPA daje rezultate koji odgovaraju zadatom impulsnom odzivu.

Za svaki set parametara prikazane su dve slike. Na gornjoj je prikaz vremena reverberacije pri čemu su crvenim linijama označene frekvencije komponenta koje sačinjavaju idealni signal. Plave linije označavaju izračunate vrednosti dobijene korišćenjem softverskog alata UPA. Na donjoj slici nalazi se prikaz linija slapa u 3 različita vremenska trenutka. Kod realnih signala skoro uvek se pojavljuju neke komponente na bliskim frekvencijama, pa je i ovaj idealni signal načinjen tako da ima dve grupe frekvencijski bliskih komponenta na 80,95 i 100Hz i 320 i 330Hz. Osnovna namena softverskog alata UPA je analiza impulsnih odziva malih prostorija tipa tonskih studija, tako da nema smisla raditi analizu komponenta na višim frekvencijama, pa su uglavnom analize rađene do 500Hz, jer su dominantne rezonantne frekvencije sigurno ispod te vrednosti.

Pregled uticaja popunjenosti na vreme reverberacije prikazan je sledećim slikama. Popunjenost podacima menjana je od 10% do 80% (ostatak je popunjen nulama). Rezolucija je 5 Hz, a preklapanje je 90% i ove vrednosti su fiksirane za ovaj set merenja.

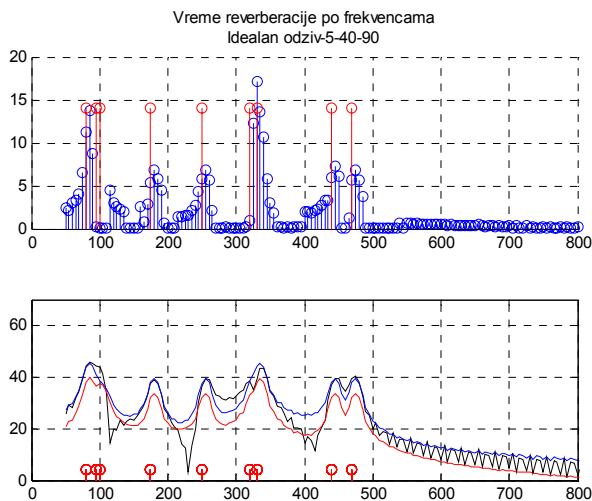


Sl.1. Analiza idealnog odziva za rezoluciju 5Hz, popunjenost 10% i preklapanje 90%

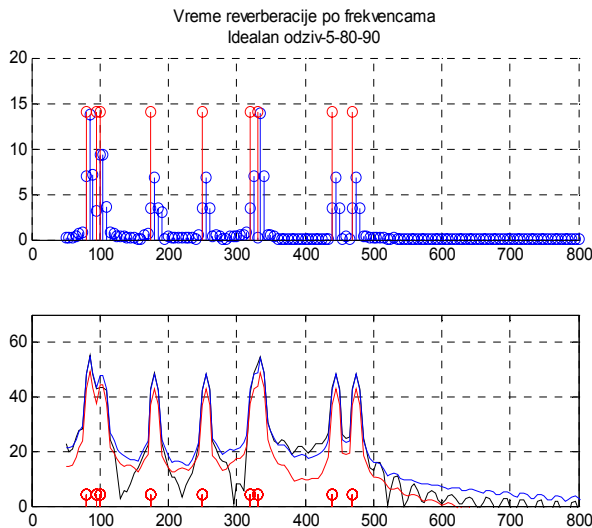


Sl.2. Analiza idealnog odziva za rezoluciju 5Hz, popunjenost 20% i preklapanje 90%

Može se primetiti da za popunjenosti do 25% dobijeni rezultati znatno odstupaju od stvarnih vrednosti.



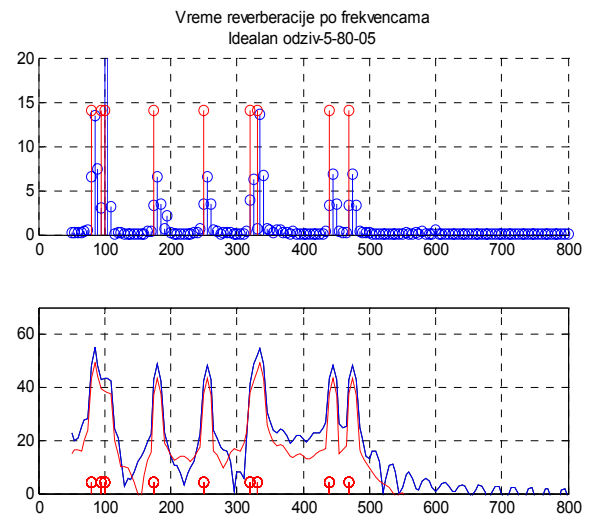
Sl.3. Analiza idealnog odziva za rezoluciju 5Hz, popunjenost 40% i preklapanje 90%



Sl.4. Analiza idealnog odziva za rezoluciju 5Hz, popunjenost 80% i preklapanje 90%

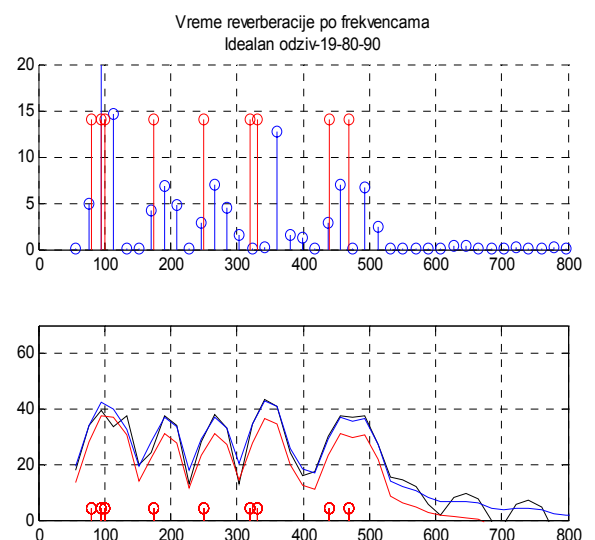
Za popunjenosti okvira podacima, koje su veće od 25% dobijene vrednosti odgovaraju stvarnim komponentama, ali ne primećuje se vrednost amplitude, a i pojavljuju se komponente na nekim frekvencijama kojih nema u idealnom signalu. Naravno što je popunjenost veća to je i dobijeni signal sličniji originalu. Za popunjenost od 80% preklapanje sa originalom je skoro idealno, pa se ova vrednost popunjenosti i koristi za dalje analize realnih impulsnih odziva. Popunjenost preko 80% nema mnogo smisla jer je kvalitet približno isti kao i za 80% popunjenosti podacima.

Preklapanje treba da bude veće da bi se pomerajem okvira uzimali novi podaci u manjim koracima. Nema zakonitosti po kojoj promena pomeraja utiče na kvalitet rezultujućeg signala, ali dobri rezultati dobijaju se za sva preklapanja koja su veća od 50% a u većini analiza realnih impulsnih odziva korišćena su preklapanja od 90%.

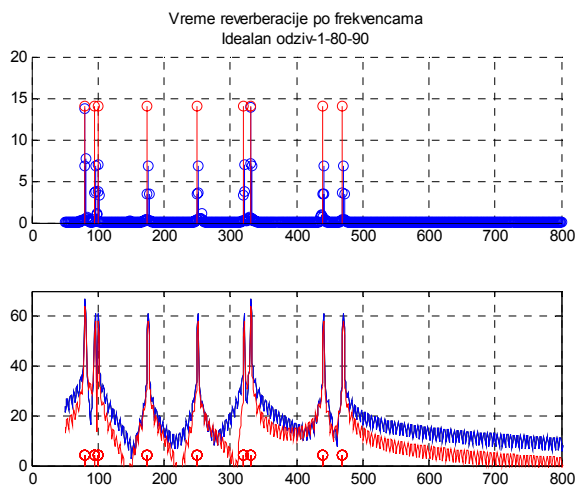


Sl.5. Analiza idealnog odziva za rezoluciju 5Hz, popunjenost 80% i preklapanje 5%

Različite rezolucije za popunjenost od 80% i preklapanje od 90% prikazane su na sledećim slikama. Vidi se da rezolucije veće od 10 Hz ne daju dobre rezultate što i nije neki problem jer je namena korišćenog softverskog alata uskopojasna analiza, pa je potrebno za male rezolucije reda Herca dobiti dobro poklapanje sa originalnim signalom. Rezoluciju ima smisla menjati od 1 do 20Hz jer se radi o uskopojasnoj analizi, ustvari zbog što preciznijeg određivanja eventualno problematičnih frekvencija najinteresantnije rezolucije su od 1 do 10 Hz. Manje rezolucije zahtevaju veća računanja, dok veće rezolucije daju lošiji kvalitet dobijenih rezultata, pa je uglavnom za analizu realnih impulsnih odziva korišćena rezolucija od 5Hz.

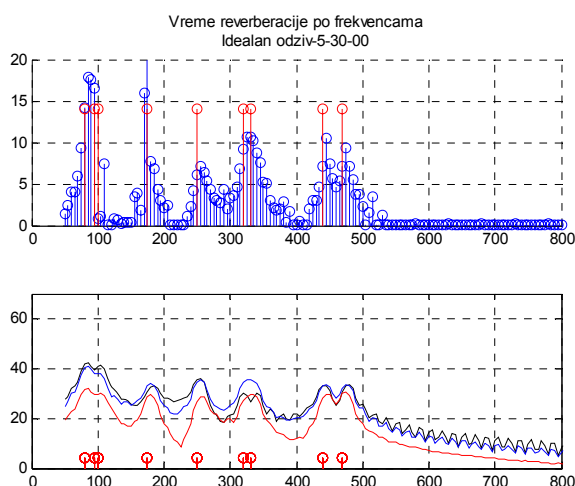


Sl.6. Analiza idealnog odziva za rezoluciju 19Hz, popunjenost 80% i preklapanje 90%



Sl.7. Analiza idealnog odziva za rezoluciju 1Hz, popunjenost 80% i preklapanje 90%

Moguće je koristiti i manju popunjenost i manje preklapanje ako je to neophodno, ali su i rezultati dobijeni na taj način manje precizni.



Sl.8. Analiza idealnog odziva za rezoluciju 5Hz, popunjenost 30% i preklapanje 0%

7. ZAKLJUČAK

Primena softverskog alata UPA za detekciju izraženih frekvencijskih komponenti u spektru, pokazala se kao veoma uspešna. Najbolji rezultati dobijaju se upravo za male rezolucije ispod 10Hz što i jeste cilj uskopojasne analize. Popunjenost okvira podacima trebala bi da bude što veća, ali čak i u slučajevima kada to nije moguće dobijaju se sasvim prihvatljivi rezultati. Preklapanje bi trebalo da bude veće od 50%, ali ako je to problem zbog većeg računanja moguće je raditi i sa manjim preklapanjima, uključujući i slučaj kada nema preklapanja.

Softverski alat za uskopojasnu analizu UPA, razvijan je pre svega u svrhu detekcije akustičkih defekata malih prostorija, ali moguće su i razne druge upotrebe, svuda gde je potrebna uskopojasna analiza. Ovaj softverski alat može uspešno da se koristi kao pomoćno sredstvo prilikom analize akustičkih karakteristika određenih prostorija.

LITERATURA

- [1] N. Vugdelija, „Prikaz jednog softverskog alata kao pomoć u rešavanju problema malih prostorija,“ 51. konferencija ETRAN, jun 4-6, Igalo, Crna Gora, 2007.
- [2] N. Vugdelija, „Detekcija rezonantnih frekvencija primenom softverskog alata UPA,“ 53. konferencija ETRAN, jun, Vrnjačka banja, Srbija, 2009.
- [3] H. Kuttruff, “Room Acoustics,“ *Applied Science Publishers Ltd*, London, 1979.
- [4] G. M. Ballou, “Handbook for Sound Engineers,“ *30 Corporate Drive, Burlington, Linacre House, Oxford*, 2005.
- [5] F. A. Everest, „The Master Handbook of Acoustics,“ *McGraw-Hill*, 2001.
- [6] Lj. Milić, Z. Dobrosavljević, „Uvod u digitalnu obradu signala,“ *Elektrotehnički fakultet, Akademska misao, Beograd*, 1999.
- [7] W. J. Palm III, „Introduction to MATLAB 6 for Engineers“, *McGraw-Hill*, New York 2001.