

Analiza jedva primetnih razlika u spektralnoj strukturi zvuka crkvenog zvona

Aleksandra Samolov *

Sadržaj — Crkvena zvona su specifični muzički instrumenti kod kojih se zbog tehnike livenja tačnost spektralnih komponenti teško može realizovati s potpunom preciznošću. Zbog toga se postavlja pitanje subjektivne primetnosti nesavršenosti njegovog zvuka. U ovom radu prikazani su rezultati analize jedva primetnih razlika u spektralnoj strukturi zvuka crkvenih zvona. Izvršeni su subjektivni testovi sa sintetizovanim signalima zvuka dva crkvena zvona različitih veličina. Zaključeno je da su jedva primetne razlike odstupanja frekvencija spektralnih komponenti u intervalu 5-25 centi i da zavise od frekvencije.

Gljučne reči — zvono, jedva primetna razlika, subjektivni test

I. UVOD

U prethodnom radu istog autora pokazani su preliminarni rezultati subjektivne analize prepoznatljivosti nesavršenosti zvuka crkvenog zvona. To početno istraživanje imalo je zadatak da pokaže okvirne vrednosti jedva primetnih razlika kada se uvode promene frekvencije pojedinačnih parcijala. Rezultati koji su dobijeni u takvom preliminarnom ispitivanju pokazali su da se u zadatim uslovima jedva primetne razlike u tom odstupanju nalaze u opsegu 10 - 20 centi, zavisno od frekvencije. [1]

U organizaciji tog eksperimenta uvedene su dve bitne aproksimacije. Prva je bila da svi parcijali imaju konstantne amplitude koje se ne menjaju u vremenu. U realnom zvuku zvona njihove amplitude opadaju jer nastaju prigušenim oscilacijama tela zvona. Druga aproksimacija je bila da svih pet parcijala sintetisanog zvuka zvona imaju jednake amplitude, iako u realnom zvuku zvona njihove amplitude nisu međusobno jednake. Zbog toga je taj prvi eksperiment koristio samo kao aproksimacija realnog zvuka zvona.

U literaturi su prikazani rezultati koji pokazuju granice percepcije promene frekvencije, to jest visine tona. Jedva primetna razlika u percepciji promene frekvencije čistog sinusnog tona zavisi od frekvencije [2]. U oblasti ispod 500 Hz čulo sluha primećuje razliku od oko 1 Hz, dok se iznad 500 Hz granica primetnosti može približno opisati

Ovaj rad je napisan na osnovu aktivnosti realizovanih u okviru projekta 23046 Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj republike Srbije.

*Aleksandra Samolov je student doktorskih studija na Fakultetu za fizičku hemiju, deo ovih studija odvija se na Elektrotehničkom fakultetu (Laboratorija za akustiku) u Beogradu (e-mail: sale1509@yahoo.com)

relacijom $0.002f$. Takođe relevantna činjenica potkrepljena od strane više autora je da postoji veća osetljivost na frekvencijsku promenu kod kompleksnih tonova, nego kod prostih [3-5]. U tom smislu, pri percepciji muzičkih tonova koji sadrže harmonike čulo sluha lakše detektuje promenu frekvencije prateći promene u višim harmonicima, nego kroz promenu osnovnog tona. Pokazano je da muzičari dok se štimuju uglavnom prate frekvencije viših harmonika [2].

Ispitujući primetnost razlike u istim intervalima različitih tonskih sistema Hill i Summers su pokazali granice percepcije kod malih i velikih terci [6]. Dobili su da je primetna promena oko 10 centi. Njihovi rezultati se dobro slažu sa vrednostima koje su dobili Parncutt i Cohen ispitujući slično pitanje [7]. Ternstroem i Sundberg ispitujući pevače u horu i način na koji razlika u nivou zvuka jednog pevača i okolnih pevača utiče na razliku u visini tona, dobili su srednju vrednost u opsegu 8-10 centi, ako su oba nivoa vrednosti od oko 90 dB [8]. Još su Lottermoser i Meyer ispitujući disperziju osnovnog tona u grupnom pevanju našli da se ona kreće u opsegu 20-30 centa [9].

Ispitujući jedva primetnu razliku u promeni akustičkih osobina različitih violina Fritz i drugi došli su do zaključka da se ova veličina kod promene frekvencije kreće u opsegu od 1.5% do 20%, u zavisnosti od uslova pod kojima je vršen eksperiment i u zavisnosti od toga da li su subjekti koji su učestvovali u eksperimentu muzičari ili nisu [10]. U istom istraživanju autori su došli do zaključka da su promene u visini tona kada se prati neka određena muzička fraza manje primetne nego kada se te promene posmatraju na pojedinačnom tonu. Ovo je slično činjenici koja je konstatovana u govoru kada se promena centralne frekvencije jednog formanta lakše primećuje kod posebnog samoglasnika nego u rečenici [11].

Moore i dr. u svom radu u kome se bave ispitivanjem granica detekcije neharmoničnosti harmonika kod kompleksnih tonova, dobijaju srednju vrednost od 4 Hz, za složene tonove čiji harmonici imaju jednake amplitude, a signali jednako vreme trajanja. U drugom eksperimentu, istih autora, trajanje signala se menja, te je primećeno da granica detekcije kod viših harmonika raste kako trajanje signala opada, i kreće se u opsegu od 1Hz do 40 Hz. Kod nižih harmonika promena je manje izražena, i približno je srazmerna promeni frekvencije harmonika [12].

Zvuk zvona ima kompleksan sadržaj jer u sebi sadrži najmanje pet značajnih komponenti koje imaju međusobno različite amplitude, koje počinju

karakterističnim tranzijentom i kasnije sve različitim brzinama opadaju u vremenu. U literaturi nema podataka o jedva primetnim razlikama u kvalitetu zvuka crkvenih zvona, osim rezultata preliminarnih eksperimenata sa značajnim pojednostavljenjima signala [1]. Zbog toga nije potpuno jasno u kojoj meri se na zvono mogu primeniti postojeći rezultati iz literature. Polazeći od te činjenice organizovana je serija eksperimenata čiji su rezultati prikazani u ovom radu. Cilj toga bilo je određivanje jedva primetne razlike u zvuku crkvenih zvona.

II. EKSPERIMENTALNI POSTUPAK

Eksperimentalno istraživanje jedva primetnih razlika u spektralnoj strukturi zvuka crkvenog zvona izvršeno je na osnovu sintetizovanih signala da bi se omogućila proizvoljna varijacija vrednosti frekvencija parcijala. Kao polazna osnova za sintezu uzet je snimak zvuka dva realna crkvena zvona različite veličine čiji je zvuk snimljen i analiziran. Prvo zvono je imalo masu oko 350 kg sa frekvencijom najnižeg parcijala 131 Hz, što odgovara muzičkom tonu c (C3). Drugo zvono je imalo masu oko 50 kg i frekvenciju najnižeg parcijala 659 Hz, što odgovara muzičkom tonu e" (E5). Ove dve vrednosti su uzete kao osnova za sintezu signala zvuka dva idealna zvona korišćena u eksperimentu.

Pretpostavljeno je da svako od dva idealna zvona ima pet značajnih parcijala koji su na način karakterističan raspoređeni u odnosu na najniži (oktava, terca, kvinta, oktava). Ovakvim izborom je postignuto da signali dva zvona sa po pet parcijala pokrivaju opseg frekvencija od 131 Hz, što je frekvencija najnižeg parcijala većeg zvona, do 2637 Hz, kolika je vrednost frekvencije najvišeg parcijala u zvuku manjeg zvona. Frekvencije i muzička visina svih parcijala prikazana je u Tabeli 1.

TABELA 1: PODACI O POJEDINAČNIM PARCIJALIMA OBA ZVONA

zvono	frekvencija (Hz)	muzička visina	relativni nivo (dB)	vreme opadanja (s)
veće	131	C3	-8.9	/
	262	C4	-3.2	40
	311.13	E4	-5.8	30
	392	G4	-10.1	8
	524	C5	-5.4	15
manje	659	E5	-5.8	/
	1318	E6	-4.3	9
	1567.98	G6	-5.4	7.5
	1975.53	H6	-4.7	5
	2637	E7	-9.4	3

Pri sintezi signala relativni odnos početnih amplituda parcijala i brzine njihovog opadanja u vremenu podešeni su da odgovaraju vrednostima koje su izmerene u zvuku realnih zvona uzetih za modele. Relativni nivoi parcijala i vreme opadanja u sintetizovanom zvuku prikazani su u Tabeli 1. Nivoi parcijala određeni su na osnovu efektivne vrednosti izračunatih u početnih 0,25 s signala, mereni

relativno u odnosu na nivo najnižeg parcijala. Prikazano vreme opadanja definisano je kao interval u kome signal parcijala opadne za 60 dB u odnosu na svoju početnu vrednost. Vreme opadanja najnižeg parcijala u zvuku realnih zvona značajno je duže od ostalih. Pošto je period slušanja zvuka u eksperimentima bio 5 s, procenjeno je da promena amplitude najnižeg parcijala zbog male brzine opadanja nije primetna slušaocu i doživljava se kao konstantna vrednost. Da bi se izbegle razlike u početnim fazama parcijala, što je pojava koja može uticati na obvojnici, na početku sintetizovanog signala uveden je „fade in“ čije je trajanje 1 ms.

Polazeći od sintetizovanog signala zvuka dva zvona pripremljen je skup signala u kojima su uvedene neke promene i koji su reprodukovani slušaocima. U njima je varirana frekvencija jednog parcijala u zadatim skokovima definisanim u centima, dok bi frekvencije ostalih bile nepromenjene. Frekvencije parcijala pojedinačno su varirane u koracima ± 5 , ± 10 , ± 15 , ± 20 , ± 25 , ± 30 , ± 40 i ± 50 centi. Promene nisu uvođene samo u frekvenciji najnižeg parcijala.

Subjektivni testovi jedva primetne razlike u tako pripremljenim signalima organizovani su uz učešće 10 subjekata. Svaki od njih je imao minimalno osmogodišnje muzičko obrazovanje, što je trebalo da garantuje razumevanje pojma disonantnosti i prepoznavanje razlika u zvuku zvona. Starost subjekata je bila između 18 i 40 godina. Niko od njih nije imao prethodno iskustvo sa učestvovanjem u ovakvim eksperimentima. Reprodukcijski signal vršen je pomoću slušalica u studijskim uslovima, čime je obezbeđena zaštita od eventualnih ometajućih zvukova sa strane.

Ispitivanje granice primetnosti pri promeni frekvencije jednog od parcijala vršeno je kroz dva eksperimenta. U prvom eksperimentu subjekti su slušali pripremljene signale u kojima je sukcesivno povećavana devijacija frekvencije jednog od parcijala. Devijacije su uvedene sa promenama frekvencije naviše i naniže, u koracima koji su gore navedeni, do ± 50 centi. Trajanje svih pojedinačnih signala bilo je 5 s i puštani su subjektima u nizu. Između susednih signala bila je pauza u trajanju 3 s. Svaki prvi signal u reprodukovanoj nizu bio je zvuk idealnog zvona sa parcijalima postavljenim na izračunatim idealnim frekvencijama, dok su sledeći signali imali promenjenu frekvenciju jednog od parcijala. Ispitanicima su grupe signala puštane nasumično, stohastički sa aspekta unetih promena frekvencije, a ne po rastućem redosledu odstupanja. Time se težilo da se izbegne efekat analitičkog fokusiranja na promenljivi parcijal. Zadatak subjekata je bio da prepoznaju kada se pojavljuju signali sa unetom promenom frekvencije.

Drugi eksperiment je tekao pod istim fizičkim uslovima, ali u formi A-B testa. Subjektima su reprodukovani parovi signala od kojih je prvi bio zvuk idealnog zvona, sa parcijalima na muzički tačnim vrednostima frekvencija iz Tabele 1 (A signal), dok je drugi signal u paru predstavljao zvuk zvona sa

promenjenom frekvencijom jednog parcijala (B signal). I u ovom eksperimentu signali su trajali 5 s, a pauza između njih 3 s. Redosled kojim su reprodukovani parovi signala bio je nasumičan da bi se izbeglo analitičko fokusiranje čula sluha. U testu su povremeno reprodukovani tzv. kontrolni parovi signala u kojima su oba signala, i A i B, bili sa idealno postavljenim frekvencijama parcijala.

III. REZULTATI

Rezultati ispitivanja jedva primetne razlike u zvuku zvona iz prvog eksperimenta prikazani su u Tabeli 2. U prvoj koloni prikazane su frekvencije parcijala idealnog zvona, u drugoj su prikazane srednje vrednosti pozitivnog odstupanja u centima pri kojem se detektuje razlika, dok su u trećoj koloni date vrednosti tih odstupanja preračunate u frekvenciju u Hz. Za izračunavanje tih frekvencija primenjena je formula

$$a = b * 2^{\frac{n}{1200}} \quad (1)$$

Rezultati ispitivanja jedva primetne razlike u zvuku zvona iz drugog eksperimenta prikazani su u Tabeli 3, gde kolone imaju isto značenje kao i u Tabeli 2.

Rezultati oba eksperimenta su prikazani i grafički na Slici 1, gde je odstupanje prikazano u funkciji tačne frekvencije parcijala. U dijagramu su ucrtane i standardne devijacije pojedinačnih rezultata dobijenih u odgovorima subjekata koji su učestvovali u testu.

IV. DISKUSIJA

Ovako organizovani eksperimenti trebali su da omoguće uvid u jedva primetne razlike kvaliteta zvuka zvona na dva načina koji se inače javljaju pri slušanju: ocenom izolovanog zvuka jednog udarca zvona i metodom njegovog poređenja sa zvukom idealnog zvona, što je realizovano A-B testom.

Rezultati ispitivanja jedva primetne razlike u zvuku zvona u prvom eksperimentu pokazuju da se ona nalazi u opsegu između 5 i 15 centi. Kod manjeg zvona, tj. na višim frekvencijama, kreće se u intervalu između 5 i 10 centi. Ovako dobijen rezultat je u saglasnosti sa poznatom činjenicom da uho pokazuje veću osetljivost na višim frekvencijama. U eksperimentu su dobijeni rezultati koji govore o zavisnosti jedva primetne razlike od parcijala čija se frekvencija menja. Rezultati, takođe, ukazuju i na zavisnost jedva primetne razlike od načina vršenja promene, tj. da li je promena frekvencije parcijala vršena naviše ili naniže. Ukupno gledano, u prvom eksperimentu, rezultati konvergiraju oko neke srednje vrednosti, koja iznosi oko 8 centi. Odstupanje od ovoga, zapaža se kod rezultata dobijenih za veće zvono, i to kod promena parcijala vršenih naviše.

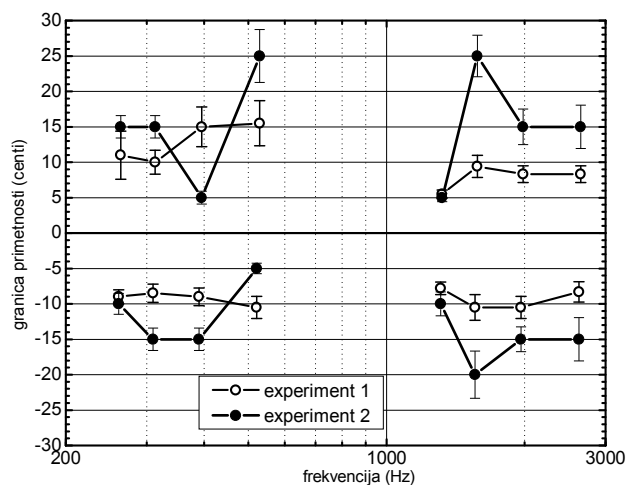
Analiza rezultata jedva primetne razlike drugog eksperimenta ukazuje da se ona nalazi u opsegu između 5 i 25 centi. Na višim frekvencijama, dobijeni rezultati imaju veće vrednosti nego u prvom eksperimentu. Najveća razlika u rezultatima uočena je na trećem

parcijalu, maloj terci. Na nižim frekvencijama, kod rezultata koji govore o pozitivnom odstupanju, vidi se skok vrednosti na četvrtom (kvinta) i petom (oktava) parcijalu. Dobijena vrednost odstupanja u centima na četvrtom parcijalu manja je nego u prvom eksperimentu, dok je kod petog parcijala ona veća. Prilikom analize rezultata većeg zvona sa negativnim odstupanjem zapaža se skok na petom parcijalu, čija je vrednost za jedva primetnu razliku manja nego u prvom eksperimentu.

Zbog načina na koji je vršen test za ispitivanje jedva primetne razlike u drugom eksperimentu, učinilo se logičnim da njena vrednost bude veća od vrednosti u prvom eksperimentu. Ona je dobijena A-B testom, gde je subjektima traženo da odgovore na pitanje da li primećuju razliku ili ne, dok se za ispitivanje ove veličine u prvom eksperimentu tražio prvi trenutak kada zvuk postaje neprijatan za slušanje.

TABELA 2: REZULTAT ISPITIVANJA JEDVA PRIMETNE RAZLIKE U ZVUKU ZVONA DOBIJENE PRVOM EKSPERIMENTU

zvono	promena	idealna frekvencija (Hz)	srednja vrednost odstupanja (centi)	frekvencija sa odstupanjem (Hz)
veće	naviše	262	+11	263.67
		311.13	+10	312.93
		392	+15	395.41
		524	+15.5	528.71
	naniže	262	-9	260.64
		311.13	-8.5	309.61
		392	-9	389.97
		524	-10.5	520.83
manje	naviše	1318	+5.5	1322.19
		1567.98	+9.4	1576.52
		1975.53	+8.3	1985.02
		2637	+8.3	2649.67
	naniže	1318	-7.8	1312.07
		1567.98	-10.5	1558.5
		1975.53	-10.5	1963.59
		2637	-8.3	2624.39



Sl. 1. Grafički prikaz jedva primetne razlike u zvuku zvona. Svetle tačke predstavljaju rezultate prvog eksperimenta, dok tamne predstavljaju rezultate drugog eksperimenta.

Poredeći eksperimentalno dobijene vrednosti sa teorijskim predviđanjima [2], dosli smo do sledećih zaključaka. Na frekvencijama ispod 500Hz, slaganje sa teorijskim podacima je dobro. Naime, po literaturi razlika u frekvenciji u ovoj oblasti trebalo bi da iznosi oko 1Hz. Eksperimentalno je i dobijena ova vrednost, s tim što se, kod parcijala čija se frekvencija kreće oko 400Hz, vrednost promene frekvencije povećava i nalazi u opsegu 3-4Hz.

TABELA 3: REZULTAT ISPITIVANJA JEDVA PRIMETNE RAZLIKE U ZVUKU ZVONA DOBIJENE DRUGIM EKSPERIMENTOM

zvono	promena	idealna frekvencija (Hz)	srednja vrednost odstupanja (centi)	frekvencija sa odstupanjem (Hz)
veće	naviše	262	+15	264.28
		311.13	+15	313.84
		392	+5	393.13
		524	+25	531.62
	naniže	262	-10	260.49
		311.13	-15	308.45
392		-15	388.62	
manje	naviše	1318	+5	1322.32
		1567.98	+25	1590.79
		1975.53	+15	1992.72
		2637	+15	2659.95
	naniže	1318	-10	1310.41
		1567.98	-20	1549.97
		1975.53	-15	1958.49
		2637	-15	2614.25

Na visokim frekvencijama, teorijski je predviđeno da promena iznosi $0.002 f$. Dobijene vrednosti se sa ovim ne slažu, i daleko prevazilaze teorijska očekivanja. Naime, teorijski promena frekvencije bi trebalo da se kreće u opsegu 1-5 Hz, dok je eksperimentalno dobijena razlika u rasponu 4-18Hz.

U već spomenutom radu, Moore i dr. [12], autori govore o dva načina percepcije inharmoničnosti složenog zvuka. Za niže harmonike (do četvrtog po redu), promenjeni harmonik se izdvaja ("štrči") iz složenog zvuka, dok se u višim harmonicima promena oseća kao "bit" ili oštrina u zvuku. Ova pojava zavisi od odnosa faza promenjenog harmonika sa fazama ostalih harmonika složenog zvuka.

Kako obvojnica signala utiče na oštrinu tona, i kako od frekvencije od oko 20Hz pa do frekvencije od oko 10 kHz, oštrina raste za faktor 50 [2], došli smo do zaključka da je ona imala jednu od važnih uloga u primećivanju razlike u zvuku naših signala. Naime, nezavisno od činjenice koji se parcijal menjao i kako, promena oblika obvojnice je bila приметna. U literaturi je, takođe, nađeno [12], da promena oblika signala, koja zavisi od relativnog odnosa

faza harmonika, utiče na stvaranje "bitova", koji su presudni u percepciji inharmoničnosti složenog zvuka.

Dobijene vrednosti, u oba opisana eksperimenta, pokazuju dobru saglasnost sa rezultatima koje su dobili drugi autori, a koje smo naveli u uvodu rada.

Ostalo je još nerešeno pitanje veze jedva приметne razlike u spektralnoj strukturi zvona sa vrednošću amplituda parcijala i njihovim vremenom opadanja. Kako u literaturi nisu nađeni podaci koji o ovome govore, mišljenja smo, da bi se poznavanjem funkcionalne zavisnosti ovih veličina, i anomalije u rezultatima mogle razjasniti.

LITERATURA

- [1] A. Samolov, M. Mijić, Subjektivna prepoznatljivost nesavršenosti zvuka crkvenog zvona-početna istraživanja, 16. Telfor, 2008, Beograd
- [2] H. Fastl and E. Zwicker, "Psychoacoustics-facts and models", 3rd ed., Springer-Verlag Berlin Heilderberg, 2007., pp 185-188, pp 239-241
- [3] N. Novitski, M. Tervaniemi, M. Huotilainen and R. Naatanen, "Frequency discrimination at different frequency levels as indexed by electrophysiological and behavioral measures", 2004., Brain Res. Cognit. Brain Res. 20, pp 26-36
- [4] C. Pantev, R. Oostenveld, A. Engelen, B. Ross and M. Hooke, "Increased auditory cortical representation in musicians", 1998., Nature (London) 23, pp 811-814
- [5] A. Shahin, D. Bosnyak, L. Trainor and L. Roberts, "Enhancement of neuroplastic P2 and N1c auditory evoked potentials in musicians", J. Neurosci. 23, pp 5545-5552
- [6] T. J. W. Hill and J. R. Summers, "Discrimination of interval size in short tone sequences", 2007., J. Acoust. Soc. Am. 121, pp 2376-2383
- [7] R. Parncutt and A. J. Cohen, "Identification of microtonal melodies-effects of scale-step size, serial order and training", Percept. Psychophys. 57, pp 835-846
- [8] S. Ternstroem and J. Sundberg, "Acoustics of choir singing", 1986., Publications of Music Acoustic Committee of the Royal Swedish Academy of Music, pp 12-22
- [9] W. Lottermoser and Fr. J. Meyer, "Frequenzmessungen an Gesungenen Akkorden", 1960., Acustica 10, pp 181-184
- [10] C. Fritz, J. Cross, B. C. J. Moore and J. Woodhouse, "Perceptual thresholds for detecting modifications applied to the acoustical properties of a violin", 2007., J. Acoust. Soc. Am. 122, pp 3640-3650
- [11] C. Lin and D. Kewley-Port, "Vowel formant discrimination for high-fidelity speech", 2004., J. Acoust. Soc. Am. 116, pp 1224-1233
- [12] B. C. J. Moore, R. B. Peters and B. R. Glasberg, "Thresholds for detection of inharmonicity in complex tones", 1985., J. Acoust. Soc. Am. 77, pp 1861-1867
- [13] D. A. Nikjeh, J. J. Lister and S. A. Frisch, "The relationship between pitch discrimination and vocal production: Comparison of vocal and instrumental musicians", 2009., J. Acoust. Soc. Am. 125, pp 328-338

ABSTRACT

Bells are specific sound sources. They have distinct, but, unlike music instruments, inharmonious partials. These partials arise from modes of vibration of the bell and depend on dimensions and potential irregularities of the bell. Therefore, question of just noticeable difference in the church bell sound is of great importance. Analysis of subjective tests with synthetic sounds of two bells, different in size, are described in this paper. We report results for just noticeable difference of partial frequency in range 10-15 cents. Frequency dependence, also, noticed.

ANALYSIS OF JUST NOTICEABLE DIFFERENCE IN SPECTRUM OF CHURCH BELL SOUND

Aleksandra Samolov