

Određivanje udarnog tona zvona

Iva Salom, Boris Despot

Sadržaj — Osnovna karakteristika zvona u muzičkom smislu je udarni ton, koji predstavlja subjektivni doživljaj visine tona zvuka zvona. Najčešće subjektivno doživljena frekvencija ne odgovara ni jednoj frekvenciji parcijala zvona. U ovom radu su prikazani rezultati poređenja frekvencija udarnog tona određenog subjektivnim testovima sa frekvencijama spektralnih komponenti za 20 zvona.

Ključne reči — udarni ton, zvono.

I. UVOD

VISINU tona nekog izvora zvuka predstavlja subjektivna percepcija frekvencije. Zvuk klasičnih muzičkih instrumenata sastoji se od diskretnih komponenata čije su frekvencije u harmonijskom odnosu. Visinu njihovog tona određuje frekvencija osnovnog harmonika. Zbog načina oscilovanja zvona, diskretne frekvencije u spektru zvuka zvona, koje odgovaraju normalnim modovima oscilovanja, takozvani parcijali, nisu u harmonijskom odnosu [1]-[5]. Visina tona, koja odgovara subjektivno doživljenoj frekvenciji zvuka zvona, naziva se udarni ton i u muzičkom smislu predstavlja osnovnu karakteristiku zvona.

Odnos frekvencija parcijala zavisi od oblika zvona. Oblik zvona koja se danas koriste u katoličkim i pravoslavnim crkvama nastao je u srednjem veku i osmišljen je tako da je relativan odnos frekvencija najnižih pet parcijala (donja oktava, prima, terca, kvinta, nominal), za koje se smatra da dominantno utiču na subjektivni doživljaj zvuka zvona: 1 : 2 : 2.4 : 3 : 4 [6]. Realna zvona, usled nepreciznosti u procesu proizvodnje, retko imaju ovakav odnos frekvencija parcijala.

Usled nedovoljnog poznavanja čovekove percepcije naročito složenih zvukova, kao što je zvuk zvona, pitanje visine tona zvuka zvona – udarnog tona, predmet je istraživanja i rasprava nekoliko vekova. Tek danas razvijena tehnologija omogućava jednostavno ispitivanje spektralnog sastava zvuka zvona i njegove promene u vremenu, veštačko generisanje zvuka zvona i menjanje pojedinih parametara, i ispitivanje njihovog uticaja na subjektivni doživljaj zvuka zvona kroz veliki broj subjektivnih testova. I pored toga, ne postoji jedinstven zaključak o uticaju frekvencija parcijala zvona na visinu tona.

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

Iva Salom, Institut Mihajlo Pupin, Volgina 15, 11050 Beograd, Srbija; (e-mail: iva.salom@institutepupin.com).

Boris Despot, Fakultet Dramskih umetnosti, Bulevar umetnosti 20, 11070 Novi Beograd, Srbija; (e-mail: boris@despot.tv).

U ovom radu izvršeno je ispitivanje 20 zvona. Subjektivnim testom određen je udarni ton i poređenjem sa spektrogramima izvedeni su zaključci.

II. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Prvo pravilo, staro nekoliko vekova, koje je povezivalo parcijale zvona i udarni ton jeste da subjektivni doživljaj visine tona odgovara virtuelnom tonu koji se nalazi za oktavu niže od frekvencije petog parcijala – nominala, a koja bi se kod idealnog zvona poklapala sa frekvencijom prime [11]. U radu [12] potvrđen je ovaj zaključak, ali se pominje i uticaj razlike između petog i sedmog parcijala. Ova razlika je u [13] istaknuta kao jedina karakteristika zvona koja utiče na udarni ton, što je objašnjeno fiziološkim efektima u čovečijem uhu. Prethodna dva stanovišta o udarnom tonu poređena su u [14] i zaključeno je da je uticaj nominala ipak dominantniji. U [15], [16] i [17] udarni ton je predstavljen kao nedostajući fundamental, nastao percepcijom nekoliko viših parcijala čije frekvencije stoje u harmonijskom odnosu, dok se u [18] udarni ton vezuje za kombinaciju nekoliko nedostajućih harmonika. Teorija o virtuelnoj visini tona ([19], [6]) objašnjava predikciju jedne ili više virtuelnih visina tona kompleksnog zvuka, kao frekvencija koje nisu fizički prisutne. U radu [10] autori su pokazali da je teorija o virtuelnoj visini tona najbolji model za predikciju prisustva udarnog tona zvona i njegove frekvencije, ali da, iako u većini, ne daje u svim slučajevima tačno rešenje. Teorija o virtuelnoj visini tona potvrđena je u radu [21].

III. PSIHOAKUSTIKA I

PROBLEMI ODREĐIVANJA UDARNOG TONA

Zvuk u ljudskom uhu može izazvati doživljaj jednog tona ili više tonova koji se čuju istovremeno. Prvi slučaj je njačešće zvuk jednog izvora čije su frekvencije u harmonijskom odnosu, ili čije frekvencije formiraju harmonijski niz u kome nedostaje osnovni harmonik, takozvani nedostajući fundamental, a koji ljudsko uho čuje. U drugom slučaju pojedine frekvencije su prizvoljnog odnosa i ljudsko uho ih doživljava kao više tonova, takozvani akord, koji može biti konsonantan ili disonantan. Po pitanju subjektivnog doživljaja zvuk zvona se nalazi na granici između ova dva slučaja: iako je zvuk zvona kompleksan, delovanjem različitih mehanizama subjektivnog doživljaja u velikom broju slučajeva izdvaja se jedan dominantan udarni ton [6].

Jedan od mehanizama je efekat frekvencijskog maskiranja - nesposobnost ljudskog uha da razazna tiši ton zbog istovremenog jačeg tona druge bliske frekvencije [22]. To znači da će subjektivni doživljaj zvuka zvona zavisiti kako od odnosa frekvencija parcijala, tako i od

relativnih odnosa njihovih amplituda, koji se menjaju u toku odzvana. Tako je moguće da dva zvona sa frekvencijama na istim parcijalima imaju potpuno drugačije udarne tonove.

Poznato je da ljudsko uho tonove istih amplituda iz različitog dela spektra doživljava kao da su različite jačine i da je dominantni opseg ljudskog sluha između 500 Hz i 4000 Hz [22]. To znači da dva zvona mogu imati iste odnose frekvencija parcijala i iste relativne odnose amplituda u svakom trenutku vremena, a da su njihovi udarni tonovi drugačije postavljeni u odnosu na frekvencije parcijala.

Na osnovu dosadašnjih psihoakustičkih saznanja i rezultata velikog broja sprovedenih slušnih testova opisanih u literaturi može se izvesti zaključak da postoje tri slučaja položaja udarnog tona u odnosu na frekvencije parcijala [6].

1) Frekvencija udarnog tona se poklapa sa frekvencijom nekog parcijala i to najčešće drugog parcijala (prima) ili prvog parcijala (donja oktava) kod manjih zvona. Ovakav udarni ton se naziva spektralni ton.

2) Udarni ton se ne poklapa ni sa jednom frekvencijom parcijala i naziva se virtuelni ton. U ovom slučaju frekvencija virtuelnog tona se nalazi u blizini nekog od parcijala, najčešće prvog (donja oktava) ili drugog (prima).

3) Udarni ton je virtuelni ton, čija frekvencija se ne nalazi u blizini ni jedne od frekvencija parcijala. Ovo je najređi slučaj.

Uzimajući u obzir sve navedene slučajeve i vrednujući moguće spektralne i virtuelne tonove određenim koeficijentima na osnovu maskirajućeg efekta i položaja u odnosu na dominantni frekvencijski opseg ljudskog sluha, razvijen je algoritam za određivanje udarnog tona, opisan u [23]. Algoritam ipak ne daje u svim slučajevima dobro rešenje iako je to jedini primer u literaturi da su uzeti u obzir svi pomenuti psihoakustički mehanizmi.

IV. SUBJEKTIVNE METODE ISPITIVANJA ZVUKA ZVONA

Postoji nekoliko načina na koje se može odrediti udarni ton zvona [21].

Poređenje sa sinusnim tonom koristi veštački generisanu sinusoidu čija frekvencija se menja dok slušalac ne utvrdi da najbolje odgovara visini zvuka zvona koje sluša naizmenično.

Vokalna reprodukcija podrazumeva snimanje pevanja tona, pokušaja slušaoca da reprodukuje na osnovu tona koji je čuo i kasniju spektralnu analizu snimka. Ovakvi subjektivni testovi su najbrži i najjednostavniji za sprovođenje, ali se oslanjaju na mogućnost subjekta da reprodukuje ono što je čuo. Nedostatak je i ograničeni opseg ljudskog glasa, iako udarni tonovi većine zvona upadaju u ovaj opseg.

Poređenje sa veštački generisanim zvucima koji liče na zvuk zvona, a čiji je udarni ton poznat.

V. SPROVEDENO ISPITIVANJE

Na osnovu zaključka da na subjektivni doživljaj zvuka zvona najveći uticaj ima početni udar [10] (naročito ako se

zvona klate ili se koriste u sklopu karilona) snimljeni signali su skraćeni na trajanje od 1 s. Pri tome je prvih 600 ms ostalo nepromenjeno, a narednih 400 ms je postepeno utišavano (*fade out*), da nagli prekid signala ne bi uticao na subjektivnu procenu.

Vršena je analiza za 19 zvona, za snimak bočno od zvona u dalekom polju, što odgovara realnom položaju slušanja zvona. Jedno zvono je analizirano za snimak bočno, ali i za snimak neposredno ispod zvona (u Tabeli 1 rezultati analize za ovo zvono dati su pod rednim brojevima 6 i 7). Pri tome se objektivnom analizom spektra uočava da se odnosi amplituda parcijala za ova dva slučaja veoma razlikuju. Od 19 zvona 10 su nova zvona izlivena u livnici Kremenović (označena svetlo sivom bojom u Tabeli 1), dok je 9 starih zvona iz nekoliko pravoslavnih crkava. Mase zvona su u rasponu od 70 kg do 2000 kg.

Tri trenirana subjekta vršila su procenu udarnog tona.. Subjekat 1 je vršio poređenje sa čistim sinusnim tonom, naizmeničnim slušanjem sa snimljenim signalom preko slušalica (*MB Quart QP 400*). Subjekat 2 je udarni ton određivao primenom metode vokalne reprodukcije (slušanje preko slušalica *AKG K240*). Subjekat 3 je, kao i subjekat 1, vršio poređenje sa čistim sinusnim tonom, (slušanje preko slušalica *AKG K240*). Subjekti su mogli proizvoljno dugo da slušaju odabrani zvuk zvona. Sva tri subjekta tvrde da zadatak nije bio nimalo lak. Jedan od problema je bio što se subjektivni doživljaj menjao posle dužeg slušanja i ostaje pitanje koji doživljaj zapravo odgovara udarnom tonu. U šest slučajeva mogla su se čuti istovremeno dva tona, dok su se u jednom slučaju mogla čuti čak četiri tona, ali su subjekti morali da se opredele za jedan dominantan. Još jedan problem bio je i određivanje tačne oktave udarnog tona. U literaturi postoje sumnje da trenirani slušaoci imaju suviše analitički doživljaj zvuka [10], što je potencijalni problem u sprovedenom subjektivnom testu.

Signali snimljenih zvona su analizirani pomoću programskog paketa Wavanal [24] i softvera realizovanog u programskom paketu Matlab [25].

Rezultati poređenja subjektivne i objektivne analize dati su u Tabeli 1. Crnom bojom označeni su udarni tonovi koji se nalaze u okolini drugog parcijala (prime), dok su sivom bojom označeni udarni tonovi koji se nalaze u okolini prvog parcijala (donje oktave).

VI. ZAKLJUČAK

Pitanje visine udarnog tona zvona i danas predstavlja jednu od akustičkih nepoznanica. Zbog složene nedovoljno ispitane percepcije ljudskog sluha udarni ton se može poklapati sa nekom od frekvencija u spektru zvuka zvona, ali češće ta frekvencija uopšte nije prisutna i naziva se virtuelni ton. Mnogi autori su se bavili ovom temom, ali još uvek nema jedinstvenog zaključka ili metode koja bi u svim slučajevima davala dobru predikciju i vezu između objektivnih i subjektivnih karakteristika zvuka zvona.

Analizom rezultata iz Tabele 1 dolazi se do nekoliko zaključaka:

- rezultati nisu jednoznačni; štaviše, nema ni jednog rezultata koji je identičan za sva tri subjekta;
- udarni ton je najčešće virtuelni ton;

TABELA 1: POREĐENJA SUBJEKTIVNIH I OBJEKTIVNIH KARAKTERISTIKA ZVONA

Zvono	Objektivna analiza – parcijali [Hz]							Subjektivna analiza – udarni ton [Hz]			
	1	2	3	4	5	6	7	subjekat 1	subjekat 2	subjekat 3	komentar
1	333.8	681.0	799.4	974.4	1332.4	1582.7	1631.1	680	333.6	332.4	
2	331.7	667.5	788.7	955.6	1305.4	1571.9	1725.3	665	331.2	329.6	
3	242.2	395.7	527.6	767.1	904.4	1176.3	1362.0	285	245.6	221.4	
4	175.0	271.4	368.8	511.0	635.2	772.5	821.0	265	93.0	157.6	
5	335.2	565.2	753.7	1313.5	1520.1	1637.2	1835.7	765	187.0	365.4	($\#^{\#} - \#^{\#}$) – 22 ϵ
6	360.7	734.8	858.6	1004.0	1375.4	1566.6	1711.9	718	366.3	361.7	
7	360.7	734.8	858.6	1004.0	1375.4	1566.6	1711.9	750	363.8	367.5	
8	279.9	489.5	586.8	839.8	963.6	1351.2	1426.6	490	477.2	477.3	($\text{des}^{\#} - \text{b}^{\#}$) + 40 ϵ
9	258.4	463.0	570.6	724.1	934.0	1103.6	1402.3	470	178.9	363.8	($\text{fis}^{\#} - \text{ais}^{\#}$) – 30 ϵ
10	236.1	441.4	516.8	740.2	866.7	1211.2	1170.5	440	218.8	440.0	($\text{a} - \text{c}^{\#} - \text{a}^{\#} - \text{c}^{\#}$)
11	202.2	388.6	479.8	664.8	732.1	848.2	1109.0	845	200.6	199.5	475 Hz
12	662.1	1176.3	1803.4	2509.4				662	293.7	295.1	659,3 Hz
13	156.1	301.4	376.8	635.2	759.0	942.1	1286.6	322	157.0	157.0	
14	199.5	371.4	458.9	590.1	681.0	756.4	1001.3	384	186.1	372.2	
15	301.4	418.9	549.1	882.9	1119.7	1184.3	1281.2	301	105.7	421.5	298 Hz
16	231.0	514.1	632.6	786.0	1068.6	1267.8	1316.2	270	131.7	260.7	
17	374.1	605.6	796.7	1084.7	1351.2	1749.6	1851.9	625	375.5	374.0	
18	191.7	371.8	428.3	568.5	691.1	1015.4	1381.5	689	341.0	691.4	
19	208.6	330.8	452.9	581.7	775.5	959.9	1172.9	770	194.2	775.6	
20	288.0	414.6	522.2	701.0	847.9	1224.7	1370.0	295	208.6	290.0	

- udarni ton se kod prvog subjekta najčešće nalazi oko drugog parcijala (prime) – kod 11 od 20 zvona, dok se kod drugog i trećeg subjekta udarni ton mnogo češće nalazi u okolini prvog parcijala (donja oktava);

- tačnost određivanja udarnog tona je do na oktavu, što znači da je subjekat siguran koji je ton u muzičkom smislu čuo, ali nije siguran kojoj oktavi pripada.

Osnovno pitanje prilikom sprovođenja subjektivnog testa jeste da li se opredeliti za analitičko ili holističko slušanje. Ovo pitanje uključuje dva podpitanja: prvo, da li subjekti treba da budu trenirani, kao što je bio slučaj u testovima opisanim u ovom radu, ili birani iz slučajno odabranog skupa, i drugo, trajanje testa.

Sledeće pitanje je vezano za vrstu testa – vokalna reprodukcija ili poređenje sa generisanim tonom, što zavisi od mogućnosti i preferenci testiranih subjekata.

S obzirom da se relativni odnosi amplituda parcijala u toku vremena menjaju, moguće je da se udarni ton menja u toku odzvana. To nameće još jedno pitanje: koji deo odzvana treba slušati i kolikog trajanja.

Razni uticaji efekta maskiranja, dominantnog frekvencijskog opsega, brzine opadanja amplituda parcijala, mogu se ispitivati na sintetizovanom zvuku zvona uz promenu određenih parametara.

Pomenuti uticaji predstavljaju dalju smernicu u istraživanju, a na nabrojana pitanja treba naći odgovore kroz veliki broj subjektivnih testova da bi se došlo do osnovnog cilja – egzaktno veze između subjektivnih i objektivnih karakteristika zvuka zvona.

ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju livnici Kremenović, koja je omogućila snimanja zvona.

LITERATURA

- [1] T. D. Rossing (editor), "Acoustics of Bells," Van Nostrand Reinhold 1984
- [2] T. D. Rossing, R. Perrin, "Vibrations of Bells," *Applied Acoustics* 20 pp41-70, 1987
- [3] N. H. Fletcher, T. D. Rossing, "The Physics of Musical Instruments," Springer; 2nd ed. 1998
- [4] A. Lehr., "Partial Groups in the Bell Sound," *J. Acoust. Soc. Am.* 79(6), pp2000-2011, June 1986
- [5] A. Lehr, "The Designing of Swingin Bells and Carillon Bells in the Past and Present," Athanasius Kircher Foundation, Astens, Netherlands 1987.
- [6] E. Terhardt, M. Seewann, "Aural and Objective determination of the Strike Note of historical Church Bells", *Acustica*, 54, pp. 129, 1984
- [7] A. T. Jones, "The Strike Note of Bells," *J. Acoust. Soc. Am.* 1, pp 373-381, 1930
- [8] A. T. Jones, G. W. Alderman, "Further Studies of the Strike Note of Bells," *J. Acoust. Soc. Am.* October 3(2A), pp 297-307, 1931
- [9] J. Pfundner, "On the Strike Note of Bells," *Acustica* 12, pp 153-157, 1962
- [10] G. M. Swallowe, R. Perrin, "On the Strike Note of Bells," Loughborough University
- [11] Rayleigh, Lord "On bells", *Phil. Mag.*, 29, pp. 1-17, 1890
- [12] Jones, A. T., "The Strike Note of Bells", *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1, pp. 373-381, 1930
- [13] Meyer, E. and J. Klaes, J. "On the Strike note of Bells", *Naturwissenschaften*, 39, pp. 697-701, 1933
- [14] Arts, J. "The Sound of Bells" *J. Acoust. Soc. Amer.*, 9, pp. 344-347, 1938
- [15] Schouten, J. F. and t'Hart, J. "The Strike Note of Bells", *Neth. Acoust. Soc. Pub. No. 7*, pp. 8-19, 1965
- [16] Pfundner, J. "On the Strike Note of Bells", *Acustica*, 12, pp. 153-157, 1962
- [17] Rossing, T. D. "Acoustics of Percussion Instruments", *Phys. Teach.*, 14, pp. 546-556, 1976
- [18] Schad, C.R. and Frik, G. "On the Strike Note of Bells", *Acustica*, 80, pp. 232-237, 1994
- [19] E. Terhardt, "Calculating Virtual Pitch", *Hearing Research*, 1, pp. 155-182, 1979
- [20] W. A. Hibbert, "The Strike Note of Bells - an old mystery solved," *The Ringing World*, pp 589 et seq., 20 June 2003

- [21] W. A. Hibbert, "The Quantification of Strike Pitch and Pitch Shifts in Church Bells," PhD Thesis, Department of Design, Development, Environment and Materials, Faculty of Mathematics, Computing and Technology, The Open University Milton Keynes, United Kingdom, April 2008
- [22] H. Š. Kurtović, "Osnovi tehničke akustike," Naučna knjiga, Beograd 1977
- [23] E. Terhardt, G. Stoll, M. Seewann, "Algorithm for extraction of pitch and pitch salience from complex tonal signals", *J. Acoust. Soc. Amer.*, 71, pp. 679, 1982
- [24] Bell Waveform Analysis Program, Version 5.3, Bill Hibbert, Great Bookham, Surrey, Copyright (C) 24 October 2004, Available: <http://www.hibberts.co.uk>
- [25] I. Salom, M. Mijić, D. Šumarac Pavlović, "Softverski alat za akustička istraživanja kvaliteta crkvenih zvana," INFOTEH, Jahorina 2009

ABSTRACT

The main characteristic of a bell is a strike note, which corresponds to a tone heard when a bell is struck. It is observed that the pitch of this note often does not correspond to the frequency of any one of the bell's normal modes. In this paper the results of comparisons between strike note and the frequencies of the bell's partials, are presented. Twenty bells were analyzed.

DETECTION OF THE STRIKE NOTE OF BELLS

Iva Salom, Boris Despot