

# Akustička istraživanja kvaliteta zvuka crkvenih zvona

Iva Salom, Dragana Šumarac Pavlović, Miomir Mijić

**Sadržaj** — Zvona predstavljaju veoma specifične izvore zvuka. U frekventijskom domenu zvuk zvona ima diskretne komponente koje, za razliku od muzičkih instrumenata, nisu u harmonijskom odnosu. Frekvencije ovih komponenti, to jest sopstvene rezonance zvona, zavise od njegovih fizičkih dimenzija, kao i od eventualnih nesavršenosti. Problemi analize ovako specifičnog signala, u smislu izdvajanja diskretnih komponenti, praćenja njihovih vremenskih promena i odnosa u vremenu i otkrivanje eventualnih anomalija tema su ovog rada.

**Ključne reči** — analiza tranzijenata, spektralna analiza, zvuk zvona.

## I. UVOD

KVALITET zvuka crkvenih zvona nije do sada kod nas predstavljao temu širih objektivnih istraživanja. Njome su se sporadično bavili istraživači i ostali zainteresovani prevashodno u domenu istorijskih i drugih društvenih nauka [1]. Istovremeno, u relevantnoj akustičkoj literaturi zvona su relativno dobro obrađena tema u mnogim svojim bitnim segmentima [2]-[45]. Posebno su dobro elaborirani principi oscilovanja i veza između materijalizacije zvona i zračenja zvuka u okolni medij. Kao rezultat toga danas postoje komercijalno dostupni jednostavni softverski alati koji služe za osnovnu analizu spektralnog sadržaja zvuka zvona [46].

Tri su činjenice bitne za razumevanje relevantnih aspekata crkvenih zvona kao istraživačke teme. Prvo, zvuk zvona ima specifičan spektralni sadržaj koga čini ograničen skup (ne više od 5-7) značajnih diskretnih komponenti, takozvanih parcijala. Te komponente su međusobno raspoređene u neharmonijskom nizu frekvencija, zbog čega se zvuk zvona razlikuje od standardnih muzičkih zvukova. Drugo, zvuk zvona nastao udarcem klatna ima sve odlike tranzijentne pojave u vremenu, sa intenzivnim dinamičkim promenama u svom početnom delu. Treće, subjektivni doživljaj zvuka zvona, odnosno zvučna slika koju stvara, predstavlja složenu psihoakustičku temu, jer subjektivni doživljaj visine tona zvona u muzičkom smislu nije uvek direktno korelisan s

njegovim spektralnim sadržajem, a tranzijentna priroda tog zvuka predstavlja uzrok složenosti doživljaja boje zvuka.

Potrebe za preciznim merenjem i kvantifikovanjem svih komponenti zvuka zvona vrlo su praktične. One proizilaze iz činjenice da je izrada, to jest livenje crkvenih zvona veoma delikatna procedura bremenita brojnim problemima od kojih svaki može da ugrozi akustički kvalitet finalnog proizvoda. Taj kvalitet je u muzičkom smislu posebno zahtevan kada više zvona treba da deluju istovremeno stvarajući neko očekivano sazvučje. Osnovni fizički defekti koji se u praksi manifestuju pri izlivanju zvona su odstupanje od preciznosti geometrije i neujednačenost legure po njihovoj zapremini. Kao posledica toga zvuk zvona ispoljava akustičke anomalije kao što su muzička nepreciznost pojedinih spektralnih komponenti, pojava parazitskih spektralnih komponenti koje kvare opšti kvalitet zvučne slike, poremećaji u obliku obvojnica pojedinih parcijala i slično.

Specifičnost prirode zvuka zvona i njegove moguće deformacije u svakodnevnoj praksi livenja koje treba detektovati čine da je analiza signala zvuka zvona u opštem slučaju složen zadatak. Cilj započetog istraživanja u ovoj oblasti je izrada softverskog alata za detaljnu kvalitativnu analizu zvuka crkvenih zvona. Takav softver ima zadatak da posluži za pouzdano testiranje ostvarenog akustičkog kvaliteta zvuka proizvedenih zvona po livnicama, što znači kao specifičan oblik finalne kontrole njihove proizvodnje. U ovom radu prikazane su osnovne karakteristike zvuka crkvenih zvona i definisani su osnovni zadaci koje taj softverski paket treba da zadovolji.

## II. KARAKTERISTIKE ZVUKA ZVONA

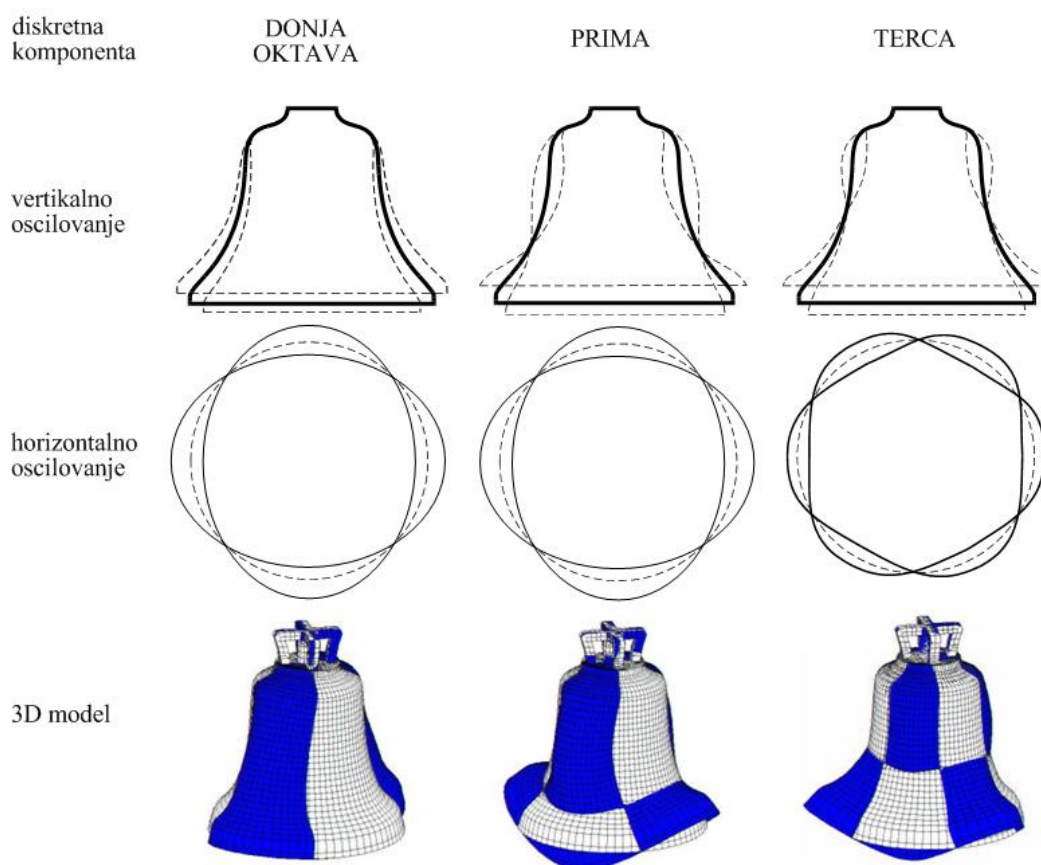
Zvuk klasičnih muzičkih instrumenata sastoji se od diskretnih komponenata čije su frekvencije u harmonijskom odnosu. Visinu njihovog tona određuje frekvencija osnovnog harmonika, a boju određuje sadržaj viših harmonika i talasni oblici obvojnica najjačih spektralnih komponenti. Za razliku od muzičkih instrumenata, gde zvuk nastaje oscilovanjem elastičnog medija sa jednim efektivnim stepenom slobode (žica ili vazdušni stub), zvuk zvona nastaje vibriranjem trodimenzionalne mase koja ima osnu simetriju. Načini oscilovanja zvona, od kojih su tri frekventijski najniža moda prikazana na Sl. 1, daju kao rezultat neharmonijske diskretne komponente u spektru nastalog zvuka [4]. Svaki od modova oscilovanja zvona ima u vertikalnoj i horizontalnoj ravni linije duž kojih nema oscilovanja (takozvane čvorove).

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: [diva@kondor.imp.bg.ac.rs](mailto:diva@kondor.imp.bg.ac.rs)).

Dragana Šumarac Pavlović, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Srbija (e-mail: [dsumarac@etf.bg.ac.yu](mailto:dsumarac@etf.bg.ac.yu)).

Miomir Mijić, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Srbija (e-mail: [emijic@etf.bg.ac.yu](mailto:emijic@etf.bg.ac.yu)).



Sl. 1. Ilustracija tri najniža moda oscilovanja zvona [4], [43]

Na kvalitet zvuka zvona dominantno utiče pet najnižih diskretnih komponenti koje su energetske najjače i čije je trajanje u vremenu najduže. Prva komponenta je označena kao donja oktava (nem. *Unteroktave*, en. *hum*, fr. *bourdon*), a ostale su prima, terca, kvinta i nominal (gornja oktava). Kod idealno "naštimovanog" zvona prima se nalazi tačno za oktavu više od donje oktave, terca i kvinta za intervale male terce (tri polustepena) i čiste kvinte (sedam polustepena) iznad prime, i nominal za oktavu više od prime.

Na Sl. 2a prikazan je primer vremenskog oblika snimljenog udara jednog realnog crkvenog zvona. Na spektru celog signala, prikazanom na Sl. 2b, mogu se uočiti odgovarajuće diskretne komponente zvuka zvona. Relativni odnosi amplituda parcijala u vremenu se menjaju. Promene intenziteta pojedinih parcijala najbolje se uočavaju na spektrogramu (Sl. 2c) i na Sl. 2d na kojoj su prikazani njihovi načini opadanja. Komponenta nominal uobičajeno nosi najviše energije (Sl. 2b), ali komponenta donja oktava vremenski mnogo duže traje. Ostale spektralne komponente imaju manju energiju i značajno kraće trajanje. U prikazanom slučaju vidljiva je i amplitudska modulacija svih parcijala.

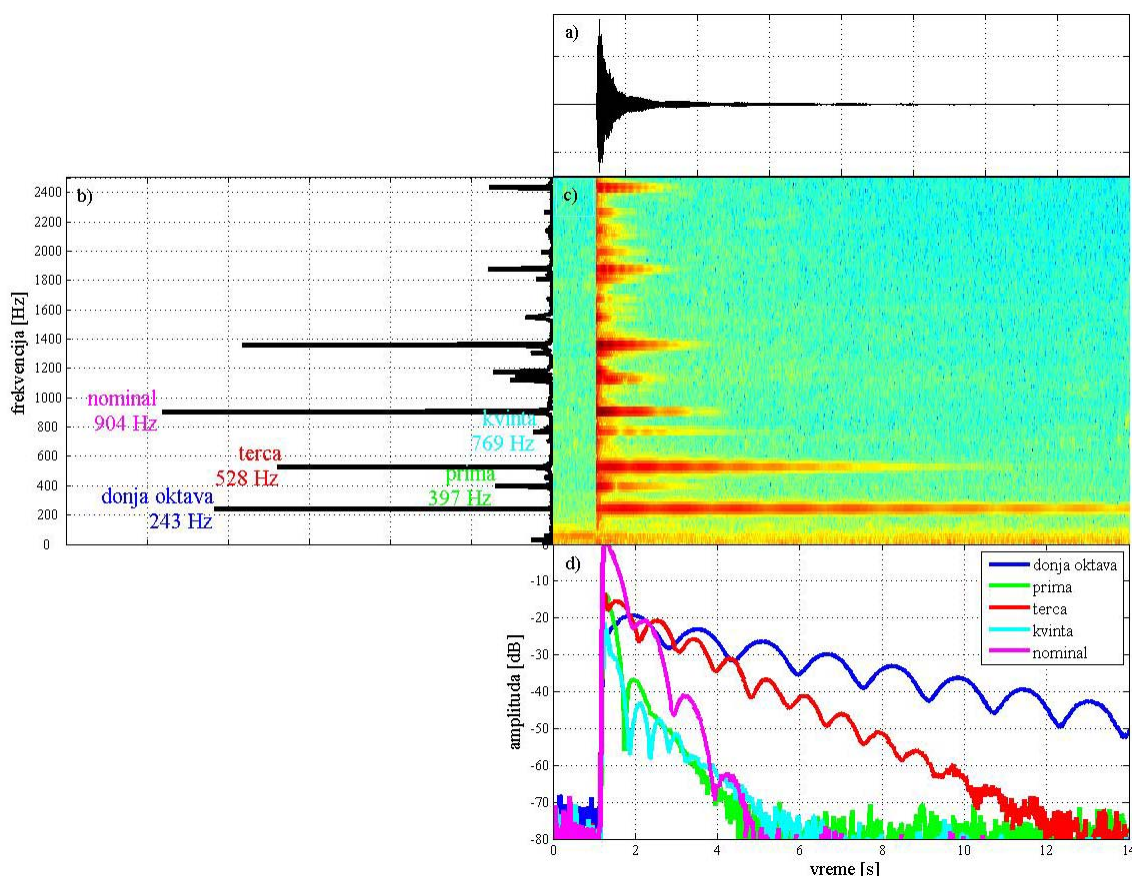
Kod realnih zvona postoje nesavršenosti u izradi zbog čega se javlja pomeranje frekvencija njihovih osnovnih parcijala u odnosu na idealno zvono. Pokazano je da kod mnogih zvona subjektivni doživljaj visine tona njihovog zvuka odgovara virtuelnom tonu koji se nalazi za oktavu niže od frekvencije nominala, a koja bi se kod idealnog

zvona poklapala sa frekvencijom prime [4], [13], [14], [19], [45]. Ovaj ton naziva se udarni ton i predstavlja u muzičkom smislu osnovnu karakteristiku zvona. Ovakav psihoakustički doživljaj objašnjava se sticajem okolnosti kada se u spektru javlja harmonijski odnos nominala i nekoliko viših diskretnih komponenti. To čini da udarni ton nastaje pojavom takozvanog „nedostajućeg fundamentala”.

### III. MOGUĆE ANOMALIJE U ZVUKU ZVONA

Veoma male nesavršenosti zvona u odnosu na zahtevani oblik, kao i nehomogenost materijala mogu uticati na frekvencijske i vremenske karakteristike parcijala, a time i na subjektivni doživljaj kvaliteta zvuka zvona. Najčešće anomalije u praksi su odstupanja relativnog odnosa frekvencija parcijala od idealnog, pomenutog u prethodnom poglavlju, i pojava udvojenih komponenti na bliskim frekvencijama.

Odstupanje relativnog odnosa frekvencija parcijala od idealnog nastaje zbog varijacija u debljini i dimenzijama pojedinih segmenata izlivenog zvona u odnosu na projektovane. Na primer, smanjenjem debljine zvona, a zadržavanjem svih ostalih karakteristika dolazi do povišenja frekvencija grupe parcijala koji se nalaze iznad nominala [3], [45]. Kvalitet zvuka zvona je obrnuto srazmeran veličini odstupanja frekvencija parcijala od tačnih vrednosti. Zbog prirode anomalija u dimenzijama veličine odstupanja frekvencija pojedinih parcijala su stohastične. U takvim okolnostima poseban problem



Sl. 2. a) Vremenski oblik snimljenog udara jednog realnog crkvenog zvona; b) spektar celog signala; c) spektrogram signala; d) obvojnice karakterističnih komponenti

nastaje kada nekoliko zvona treba zajedno da rade, jer se tada očekuje određeni muzički sklad njihovih spektralnih komponenti.

U Tabeli 1 prikazane su stvarne vrednosti frekvencija prvih pet parcijala zvona sa Sl. 2 i idealne vrednosti u odnosu na donju oktavu tog zvona, kao i odstupanja poređenih vrednosti.

Kao posledica osne nesimetričnosti dolazi do pojave dve bliske komponente u okolini očekivanog parcijala, koje mogu dovesti do efekta „izbijanja” i do karakteristično promenjenog zvuka zvona. Detekcija ovih komponenti u spektru može pomoći u ranom otkrivanju nesavršenosti zvona i njihovom lakšem otklanjanju.

Na primeru zvona sa Sl. 2 može se uočiti pojava izbijanja na gotovo svim parcijalima. Na Sl. 3 prikazan je uveličan deo spektra oko komponente donja oktava, gde se uočava postojanje dve bliske komponente. Razlika frekvencija ove dve komponente može biti veoma mala (u konkretnom slučaju je 0.6 Hz) pa je potrebna veoma velika frekvencijska rezolucija za analizu ovakvog signala.

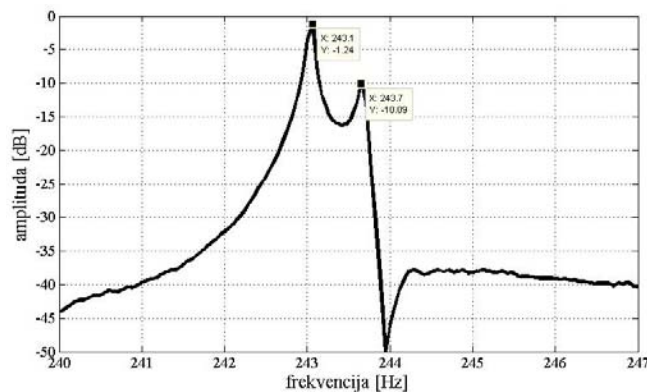
Pomenute anomalije zvuka zvona posledica su nesavršenosti procesa livenja. Međutim, usled duge upotrebe može doći do oštećenja zvona (na primer, pucanja), koja rezultuju promenom zvuka zvona. Oštećenja mogu biti posledica istrošenosti materijala, načina udaranja bata, načina kačenja zvona. Analizom signala može se utvrditi vrsta i stepen oštećenosti zvona [47].

Na karakteristike zvuka zvona utiče i bat kojim se pobuđuje zvono: materijal od kog je napravljen, jačina i

mesto udara. Na primer, ako se batom pogodi čvor, linija u kojoj zvono ne osciluje za određene modove, može doći do nepobuđivanja tih modova i izostanka diskretne komponente u spektru.

TABELA 1: STVARNE I IDEALNE VREDNOSTI FREKVENCIJA PRVIH PET PARCIJALA ZVONA SA SLIKE 2

Parcijal	Stvarna frekvencija [Hz]	Idealna frekvencija [Hz]	odstupanje [centi]
donja oktava	243	243	0
prima	397	486	-350
terca	528	578	-157
kvinta	769	728	95
nominal	904	972	-126



Sl. 3. Uveličani deo spektra oko donje oktave zvona sa Sl. 2

#### IV. ZAKLJUČAK

Zvuk zvona predstavlja specifičan signal čija je detaljna vremensko-frekvencijska analiza, zbog njegove tranzijente prirode i česte pojave vrlo bliskih spektralnih komponenti (sa razlikama od delova Herca), vrlo složena. S druge strane, određivanje svih relevantnih karakteristika zvuka zvona praktičan je zahtev koji se postavlja u livnicama radi finalnog testiranja kvaliteta proizvoda. Zbog toga je razvoj metodologije za detaljnu vremensko-frekvencijsku analizu sadržaja zvuka zvona aktuelan istraživački zadatak.

Nedostatak vremenski zavisne Furijeove transformacije, kojom su izvršene preliminarne analize iz koje su neki rezultati prikazani u ovom radu, ogleđa se u međuzavisnosti vremensko-frekvencijske rezolucije. Problem u primeni ove transformacije u analizi zvuka zvona je i konstantna frekvencijska rezolucija. Takve osobine onemogućavaju da se Furijeovom transformacijom sagledaju svi relevantni detalji ovog specifičnog signala.

Preliminarna istraživanja su pokazala da se rešenje za analizu zvuka zvona mora tražiti u primeni banke odgovarajućih filtara. Dalji korak u ovom istraživanju treba da bude razvoj algoritama za detekciju i praćenje promena parcijala u zvuku zvona i otkrivanje eventualnih odstupanja od postavljenih standarda. Krajnji rezultat treba da bude softverski paket koji daje neku vrstu „lične karte” analiziranog zvona sa svim podacima od značaja za subjektivni doživljaj njegovog zvuka. Primena ovakvog softverskog alata, kakav od sada nije razvijan kod nas, može biti široka, od livnica gde bi se koristio za rano otkrivanje deformacija izlivenog zvona, preko kontrole stanja zvona tokom njihove upotrebe, do izrade akustičkog atlasa zvona koja danas postoje u srpskim pravoslavnim crkvama, što bi bio originalni doprinos u sferi kulturnog nasleđa.

#### LITERATURA

- [1] N. Bura, "Zvona kroz istoriju," Beograd 2004
- [2] A. Lehr, "Contemporary Dutch Bell-Founding Art, Hedendaagse Nederlandse Klokkengietkunst"; Neth. Acoust. Soc. Publ. 7, pp20-49, 1965
- [3] A. Lehr, "Partial Groups in the Bell Sound", J.Acoust.Soc.Am. 79(6), pp2000-2011, June 1986
- [4] A. Lehr, "The Designing of Swingin Bells and Carillon Bells in the Past and Present," Athanasius Kircher Foundation, Asten, Netherlands 1987.
- [5] T. D. Rossing (editor), "Acoustics of Bells", Van Nostrand Reinhold 1984
- [6] T. D. Rossing, R. Perrin, "Vibrations of Bells", Applied Acoustics 20 pp41-70, 1987
- [7] T. D. Rossing, R. Perrin, H. J. Sathoff, R. W. Peterson, "Vibrational modes of a tuned handbell", J.Acoust.Soc.Am. 76(4), pp1263-1267, Oct 1984
- [8] T. D. Rossing, D. S. Hampton, B. E. Richardson, H. J. Sathoff, A. Lehr., "Vibrational modes of Chinese two-tone bells", J.Acoust.Soc.Am. 83(1), pp369-373, Jan 1988
- [9] Lord Rayleigh, "On Bells", The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, Fifth Series, Vol. 29, No. 176, January 1890
- [10] A. B. Simpson, "On Bell Tones", The Pall Mall Magazine, Vol. VII, September to December 1895
- [11] A. B. Simpson, "On Bell Tones II", The Pall Mall Magazine, Vol. X, September to December 1896
- [12] A. T. Jones, "The Vibration of Bells", Phys. Rev. 31, pp 1092-1102 1928
- [13] A. T. Jones, "The Strike Note of Bells", J.Acoust.Soc.Am. 1, pp 373-381, 1930
- [14] 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
- [15] A. T. Jones, G. W. Alderman, "Component tones from a Bell", J.Acoust.Soc.Am. 4 (4), pp 331-343, April 1933
- [16] A. N. Curtiss, G. M. Giannini, "Some Notes on the Character of Bell Tones", J.Acoust.Soc.Am. 5, pp 159-166, 1933
- [17] J. Arts, "The Sound of Bells - Jottings from my experiences in the domain of the sound of bells", J.Acoust.Soc.Am. 9, pp 344-347, 1938
- [18] J. Arts, "The Sound of Bells - Jottings from my experiences with the sound of bells. The Secondary Strike Note", J.Acoust.Soc.Am. 10, pp 327-329, 1939
- [19] J. Pfundner, "On the Strike Note of Bells", Acustica 12, pp 153-157, 1962

- [20] M. J. Milsom, "Tuning of Bells", The Ringing World, p733, September 3, 1982
- [21] H. Bagot, "Tuning: Mystery of the strike note", The Ringing World, pp 672, August 13, 1982
- [22] R. Perrin, T. Chamley, "Group theory and the bell", Journal of Sound and Vibration 31, pp 411-418, 1973
- [23] R. Perrin, T. Chamley, J. DePont, "Normal Modes of the Modern English Church Bell", Journal of Sound and Vibration 90(1), pp 29-49, 1983
- [24] R. Perrin, T. Chamley, G. M. Swallowe, "On the tuning of church and carillon bells", Applied Acoustics 46, pp 83-101, 1995
- [25] R. Perrin, G. M. Swallowe, T. Chamley, C. Marshall, "On the Debossing, Annealing and Mounting of Bells", Journal of Sound and Vibration 227(2), pp 409-425, 1999
- [26] R. Perrin, G. M. Swallowe, "Rayleigh's Bell Model Revisited", Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference, (SMAC 03), August 6-9 2003
- [27] R. Perrin, "A Group Theoretical Approach to Warble in Ornameted Bells", Journal of Sound and Vibration 52(3), pp 307-313, 1977
- [28] R. Perrin, T. Chamley, "A Comparative Study of the Normal Modes of Various Modern Bells", Journal of Sound and Vibration 117(3), pp 411-420, 1987
- [29] R. Perrin, T. Chamley, "On the RIR Modes of the Modern English Church Bell", Journal of Sound and Vibration 119(2), pp 243-247, 1987
- [30] R. Perrin, T. Chamley, H. Banu, T. Rossing, "Chladni's Law and the Modern English Church Bell", J. of Sound and Vibration 102(1), pp 11-19, 1985
- [31] H. L. Kuntz, "Acoustic radiation characteristics of two buoy bells", J.Acoust.Soc.Am. 79(6) pp 2021-2027, June 1986
- [32] H. L. Kuntz, E. L. Hixson, "Vibration characteristics of two buoy bells", J.Acoust.Soc.Am. 79(6) pp 2012-2020, June 1986
- [33] H. Bagot, "Bells, Their Design and Tuning", Acoustics Australia 14 (2) pp 35-41, August 1986
- [34] H. Bagot, "The Bell - Where do we stand today?", Fifth International Congress on Sound and Vibration, Adelaide, South Australia, Dec 15-18, 1997
- [35] D. Kelly, "The Sound of Bells", The Ringing World, pp 239-40, 394-7, 631-2, 749, 1997
- [36] I. Aldoshina, A. Nicaranov, "The Investigation of Acoustical Characteristics of Russian Bells", Audio Engineering Society, 108th Convention, Paris, Preprint 5117, February 19-22, 2000
- [37] I. Aldoshina, I. Matciewski, A. Nicaranov, P. Tovstik, "The analysis of peculiarities of Russian bells acoustic parameters", Audio Engineering Society, 114th Convention, Amsterdam, Convention Paper 5794, March 22-25, 2003
- [38] M. Karjalainen, V. Välimäki, P. A. A. Esquef, "Efficient Modeling and Synthesis of Bell-Like Sounds", Proc. of the 5th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx-02), Hamburg, Germany, pp181-186, September 26-28, 2002
- [39] N. McLachlan, B. K. Nigieh, "The design of bells with harmonic overtones", J.Acoust.Soc.Am. 114 (1), pp 505-511, July 2003
- [40] T. Nakanishi, T. Miura, T. Masaeda, A. Yari, "Influences of the shapes of a temple bell's parts on acoustic characteristics", Acoust.Sci. & Tech. 25(5), pp 340-346, 2004
- [41] H. Speiss, B. Lau, P. Wriggers, A. Schneider, R. Bader, M. Wiggenghen, "Analysis of Bell Vibrations", 2nd Conference on Advances and Applications of GiD, CIMNE, Barcelona 2004
- [42] M. Özakça, M. T. Göğüş, "Structural Analysis and Optimization of Bells Using Finite Elements", Journal of New Music Research 33(1), 61-69, 2004
- [43] H. Spiess, B. Lau, P. Wriggers, A. Schneider, R. Bader, M. Wiggenghen, "Analysis of Bell Vibrations," Available: <http://gid.cimne.upc.es/2004/papers/p199.pdf>
- [44] W. A. Hibbert, "The Strike Note of Bells - an old mystery solved", The Ringing World, pp 589 et seq., 20 June 2003
- [45] 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
- [46] Bell Waveform Analysis Program, Version 5.3, Bill Hibbert, Great Bookham, Surrey, Copyright (C) 24 October 2004, Available: <http://www.hibberts.co.uk>
- [47] A. Rupp, "Ringing Bells - State of the Art in the Durability Evaluation of Church Bells," Development and Evaluation, LAWEK, Ljubljana, Slovenia, March 3, 2006, Available: <http://www.probell.net>

#### ABSTRACT

Bells are very 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. Problems of analysis of such signal, including detecting partials and tracking their changes in time, and detecting potential irregularities, are described in this paper.

#### ACOUSTICAL RESEARCH OF SOUND QUALITY OF CHURCH BELLS

Iva Salom, Dragana Šumarac Pavlović, Miomir Mijić