

Uticaj estimacije frekvencija harmonika na procenu koeficijenta inharmoničnosti čembala

Tatjana Miljković, Jovana Damjanović, Jelena Čertić, Dragana Šumarac Pavlović

Apstrakt—Inharmoničnost je pojava koja se javlja kod muzičkih instrumenata koji se teorijski smatraju harmoničnim, i predstavlja odstupanje frekvencija parcijala tona od celobrojnih umnožaka osnovne frekvencije tona. Za žičane muzičke instrumente, u literaturi se definiše koeficijent inharmoničnosti, kao mera odstupanja od idealne harmoničnosti. U prethodnom istraživačkom radu pokazano je da automatski algoritam za procenu koeficijenta inharmoničnosti tonova klavira za pojedine tonove iz registra ne vrši dobru estimaciju koeficijenta inharmoničnosti. U ovom radu razmatran je uticaj tačnosti procene frekvencija harmonika na procenu koeficijenta inharmoničnosti. Sprovedena je uporedna analiza dve metode za procenu spektra signala, i to procena spektra na osnovu autoregresivnog AR modela i metodom diskretne Furijeove transformacije DFT. Testiranje predloženih metoda za procenu spektra izvršeno je na realnim tonovima čembala. Ustanovljeno je, na osnovu trenda koeficijenta inharmoničnosti računatog pomoću obe metode za procenu spektra, da je metoda AR modelom superiornija, odnosno da se dobijaju relevantni rezultati za koeficijent inharmoničnosti na celom opsegu tonova od interesa.

Ključne reči—Inharmoničnost, žičani instrumenti, čembalo, procena spektra.

I. UVOD

„Idealna“ žica predstavlja žicu zategnutu na oba kraja, koja se ne odlikuje krutošću. Jedna od glavnih karakteristika takve žice, sa aspekta stvaranja zvuka, je što pri njenom okidanju dolazi do formiranja niza harmonika koji predstavljaju celobrojne umnoške osnovne frekvencije žice. U realnosti nemoguće je posmatrati žicu kao element sa svojstvima idealne fleksibilnosti, već je neophodno uvesti dodatne parametre poput krutosti, debljine, težine i napetosti žice. Krajem XIX veka *John William Strutt*, lord *Rayleigh*, razmatrajući oscilovanje žica klavira, ustanovio je da krutost same žice utiče na parcijale tonova, tako što frekvencije parcijala tonova na klaviru odstupaju od predefinisanih frekvencija parcijala idealne žice [1]. Pojava odstupanja frekvencije parcijala tona od celobrojnih umnožaka osnovne

frekvencije tona naziva se inharmoničnost.

Matematičko-fizički modeli [2], [3], [4] koji u osnovi opisuju inharmoničnost kod klavira, definišu principski jednostavne relacije koje pojavu opisuju preko koeficijenta inharmoničnosti, koji se definiše za svaku žicu instrumenta.

Postoje različite metode i algoritmi za procenu koeficijenta inharmoničnosti na osnovu tonova instrumenta od interesa. *Galembo* i *Askenfelt* [5] predložili su jednu od metoda za procenu koeficijenta inharmoničnosti koja se zasniva na inharmoničnom komb filtru, realizovanom u frekvencijskom domenu. Takođe, tehnike poput određivanja visine tona, kepsralne analize i HPS (*Harmonic Product Spectrum*) su korišćene za estimaciju inharmoničnosti [6], [7]. Jedan od algoritama koji se odlikuje automatskim postupkom za estimaciju koeficijenta inharmoničnosti jeste PFD (*Partial Frequency Deviation*) algoritam [8]. Princip rada algoritma zasniva se na minimiziranju devijacije, koja je nastala kao razlika frekvencija parcijala procenjenih iz spektra tona i frekvencija parcijala računatih na osnovu matematičkog modela. Sam proces minimizacije frekvencijske devijacije se odvija iterativnim postupkom, gde je krajnji produkt algoritma estimirana vrednost koeficijenta inharmoničnosti tona.

U prethodnom istraživačkom periodu analizirani su različiti klaviri na osnovu PFD algoritma za procenu koeficijenta inharmoničnosti. Izvršena je analiza koeficijenta inharmoničnosti procenjena sa različitim brojem parcijala tonova. Takođe, utvrđeno je da se takav algoritam može koristiti za procenu koeficijenta inharmoničnosti tonova klavira za skoro celokupni registar instrumenta [9]. Za pojedine tonove iz opsega klavira, iako je došlo do konvergencije samog algoritma, estimirana vrednost koeficijenta inharmoničnosti nije bila tačna. Razlog za lošu procenu koeficijenta inharmoničnosti pojedinih tonova leži u lošoj proceni frekvencija parcijala tona iz spektra signala.

U ovom radu razmatran je uticaj tačnosti procene frekvencija harmonika na procenu koeficijenta inharmoničnosti. Korišćen je pomenuti iterativni algoritam PFD, pri čemu je akcenat stavljen na prvi korak adaptivnog algoritma, odnosno procenu frekvencija tona iz spektra. Izvršena je uporedna analiza dve metode za procenu spektra signala i to procena spektra na osnovu AR (*Autoregressive*) modela i metodom DFT (*Discrete Fourier transform*). Uticaj tačnosti estimacije frekvencija harmonika na procenu koeficijenta inharmoničnosti testiran je na tonovima čembala. Za potrebe rada izvršeno je snimanje tonova čembala na Fakultetu muzičke umetnosti u Beogradu. Čembalo je izabrano kao instrument za analizu, jer se spektri njegovih tonova odlikuju velikim brojem harmonika. Prisutnost velikog

Tatjana Miljković – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: tm@etf.bg.ac.rs).

Jovana Damjanović – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: dj193200m@etf.bg.ac.rs).

Jelena Čertić – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: certic@etf.bg.ac.rs).

Dragana Šumarac Pavlović – Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd, Srbija (e-mail: dsumarac@etf.bg.ac.rs).

broja parcijala u spektru tona je značajna, zbog činjenice da su fizičke pojave koje opisuju fenomen inharmoničnosti uočljivije na višim parcijalima tona.

Rad je organizovan kako sledi. U drugom poglavlju date su osnovne razlike između čembala i klavira, poput mehanizma stvaranja zvuka i spektralne odlike tona ovih instrumenata. U narednom poglavlju prikazane su metodologije za procenu spektra korišćene u iterativnom algoritmu za procenu koeficijenta inharmoničnosti. U četvrtom poglavlju prikazani su eksperimentalni rezultati i diskusija dobijenih rezultata. Na kraju izneti su zaključci do kojih se došlo u ovom istraživanju.

II. OSNOVNE RAZLIKE IZMEĐU ČEMBALA I KLAVIDA

Žičani instrumenti su svi oni instrumenti kod kojih se zvuk stvara vibriranjem žice. S obzirom na različite načine pobuđivanja žice na vibriranje žičani instrumenti se mogu klasifikovati u 3 podgrupe, i to na: gudačke instrumente (violina, violončelo), trzane (gitara, čembalo) i udarne žičane instrumente (klavir) [10].

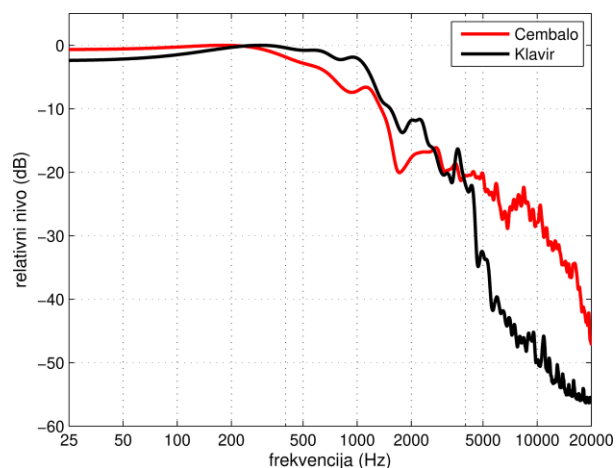
Čembalo je predstavnik žičanih instrumenata, koji spadaju u podgrupu trzanih žičanih instrumenata sa klavijaturom. Iako izgledom podseća na klavir, postoji nekoliko suštinskih razlika između ova dva instrumenta. Jedna od razlika je u materijalu od kojih su sačinjena ova dva instrumenta. Čembalo je izgrađeno od laganog drvenog okvira, tankih žica i nema pedale. Dok je klavir izgrađen od teškog gvođenog okvira, debljih žica gde su neke od njih i obmotane i pedala. Takođe, čembalo može imati jednu, dve ili tri klavijature, koje se nazivaju manuali. Opseg tonova koji se može odsvirati na čembalu je manji u odnosu na klavir i uglavnom iznosi 5 oktava, dok opseg klavira uglavnom iznosi sedam oktava [11].

Značajna razlika između ova dva instrumenta je u mehanizmu nastanka zvuka. Kod klavira zvuk nastaje udarcem čekića o veoma zategnutu žicu, dok kod čembala zvuk nastaje okidanjem blago rastegnute žice perom. Pero koje služi za okidanje žice nalazi se na pokretnom jezičku, smeštenom na vrhu stubića, koji svojim donjim krajem naleže na zadnji kraj dirke. Prilikom pritiska dirke, njen zadnji kraj podiže stubić, tako da pero, u kretanju naviše zakači žicu i proizvede zvuk. Istovremeno, tim dodiranjem sa žicom izbacuje se jezičak iz osnovnog položaja kako pero ne bi pri silaznom kretanju stubića, ponovo zakačilo žicu i time proizvelo novi zvuk. Pri otpuštanju dirke, stubić koji je na donjem kraju opterećen olovom, vraća se u prvobitni položaj, pri čemu posebna opruga vraća i jezičak u vertikalni stav. Pošto se pri vrhu stubića nalazi i mali prigušivač, povratkom u prvobitni položaj on dotiče žicu i prekida njeno treperenje.

Važna karakteristika čembala je u tome da se snagom udara u dirku ne može uticati na jačinu proizvedenog tona, jer trzaj koji čini pero vrlo malo zavisi od te snage. Zato se dinamičke promene mogu ostvariti jedino uključivanjem raznih registara. Pojam registra u ovom smislu ne odnosi se na određeni instrumentalni tonski opseg već predstavlja na određeni način ostvaren zvuk posebnih odlika u dinamici ili tonskoj boji [10]. Ukoliko instrument ima dva manuala, na gornjem manualu svakoj dirci odgovaraju po dve žice, gde je jedna štimovana

na nominalnu tonsku visinu dirke, a druga za oktavu više. Na donjem manualu svaka dirka takođe ima po dve odgovarajuće žice, jednu na nominalnoj tonskoj visini, a drugu za oktavu niže štimovanu. Time, za svaki ton postoje u instrumentu po četiri žice. Osim registara za razne dinamičke promene, postoje i takvi koji zvuku instrumenta daju novu boju, sličnu tonu laute ili harfe.

Još jedna od razlika između čembala i klavira jeste značajno bogatije prisustvo harmonika u tonovima čembala u odnosu na klavir. Na Sl. 1. prikazani su usrednjeni spektri tonova klavira i čembala u okviru celog frekventijskog opsega. Sa slike se može uočiti da zbog prisustva većeg broja harmonika usrednjeni spektar čembala je izdignutiji u odnosu na spektar klavira za otprilike 30 dB na višim frekvencijama.



Sl. 1. Usrednjeni spektri klavira i čembala u okviru celog frekventijskog opsega.

III. METODOLOGIJA PROCENE SPEKTRA I ODREĐIVANJA KOEFICIJENTA INHARMONIČNOSTI

Kako bi se pojam inharmoničnosti tona mogao objektivizirati, stvorena je formulacija na osnovu koje se može odrediti frekvencija k -tog harmonika odsviranog tona kao:

$$f_k = k f_0 \sqrt{1 + k^2 B}, \quad (1)$$

gde je k redni broj harmonika, f_0 osnovna frekvencija tona, a B koeficijent inharmoničnosti nastao pri sviranju tona [3]. Koeficijent inharmoničnosti B se može izračunati na osnovu (1), gde bi se na osnovu spektra realnog signala odredilo prvih k harmonika odsviranog tona, a zatim na osnovu njih procenila vrednost B . Jedan od predloženih algoritama za automatsku procenu koeficijenta inharmoničnosti je PFD algoritam [8]. Iterativni deo PFD algoritma se zasniva na izračunavanju devijacije frekvencije parcijala, gde se proračunava razlika niza frekvencija parcijala dobijenih iz procene spektra i odgovarajućeg niza frekvencija parcijala dobijenih na osnovu jednačine (1) za vrednost B u tekućoj iteraciji. Na osnovu trenda devijacije frekvencije, donosi se odluka da li se koeficijent B povećava ili smanjuje [8]. Sam algoritam se pokazao kao dosta robustan u situacijama kada u spektru signala nedostaje neki harmonik ili kada je frekvencija pojedinog parcijala pogrešno procenjena. Međutim, u prethodnom istraživačkom radu ispostavilo se da za pojedine

tonove iz registra klavira dolazi do loše procene koeficijenta B [9]. Razlog za lošu procenu koeficijenta B leži u početnom koraku samog algoritma gde se vrši procena spektra i određuju vrednosti prvih k frekvencija parcijala. Sama procena frekvencija prvih k harmonika može se realizovati na različite načine, DFT analizom [8], [12], tehnikama zasnovanim na inharmoničnim češljastim filtrima [5], [13], kao i AR modelima [14]. U ovom radu razmatran je uticaj procene frekvencija harmonika na tačnost procene parametra B na primeru snimljenih tonova jednog čembala. Kao metode procene spektra korišćene su metode: DFT analiza i AR modelovanje.

A. Metoda 1 – DFT analiza

DFT analiza predstavlja klasičan pristup u proceni spektra signala. U obradi audio signala, zbog nestacionarnosti signala, često se koristi analiza po segmentima, odnosno „prozorima“. Dodatno, procena tačne pozicije komponenti u spektru se popravljala dodavanjem nula, odnosno računanjem DFT-a u više tačaka nego što je dužina segmenta signala. Dužina prozora, tip prozorske funkcije kao i broj tačaka u kojima se DFT računa su parametri koji utiču na tačnost procene frekvencija harmonika.

Kao ulazni podaci algoritma za procenu koeficijenta B koriste se odbirci audio signala snimljenog tona čembala.

Na početku analize, signal je prozorovan *Hamming*-ovom prozorskom funkcijom. Naredni korak je računanje spektra prozorovanog signala pomoću DFT. Kako bi frekvencijska rezolucija spektra signala bila dobra, neophodno je niz dopuniti nulama do vrednosti 2^{16} , a zatim izvršiti izračunavanje spektra signala u 2^{16} tačaka. Dodavanjem nula postignuto je lakše procenjivanje spektralnih komponenti signala.

Za posmatrani audio signal na samom početku vrši se procena osnovne frekvencije tona. Osnovna frekvencija tona se određuje tako što se za osnovnu frekvenciju tona proglasi frekvencija koja odgovara najvećoj amplitudi u spektru za predloženi opseg, definisan na osnovu očekivanih frekvencija za ton koji se analizira. Kod tonova koji pripadaju nižem registru čembala, ova metoda za procenu osnovne frekvencije tona daje loše rezultate. Razlog za lošu procenu leži u tome što u predloženom opsegu za datu osnovnu frekvenciju postoji nekoliko frekvencija čije su pripadajuće amplitude sličnih vrednosti. U tom slučaju, da bi se izbeglo pogrešno procenjivanje osnovne frekvencije za tonove iz nižeg registra procenjuje se frekvencija prvog harmonika tona.

S obzirom na to da je očekivano da se harmonici nalaze na celobrojnim umnošcima osnovne frekvencije tona, moguće je izvršiti manipulaciju nad spektrom u cilju smanjivanja neinformativnih delova spektra signala. U tom kontekstu, spektar se deli na podopsege gde se iz svakog podopsega vrši selekcija 10 spektralnih komponenti sa najvećim amplitudama. Širina podopsega je definisana kao $3f_1$, gde f_1 predstavlja procenjenju frekvenciju prvog parcijala tona. Deo procene spektra, u slučaju primene DFT analize se završava na početku samog iterativnog algoritma, gde se još jednom vrši selekcija spektralnih komponenti. Nad već redukovanim

spektrom signala, vrši se selekcija frekvencija parcijala tona f_k koje odgovaraju maksimalnoj amplitudi spektra unutar zatvorenog intervala. Donja granica intervala predstavlja razliku frekvencije parcijala tona f_k i pomeraja Δf , dok gornja granica intervala predstavlja zbir frekvencije parcijala tona f_k i pomeraja Δf . Za vrednost pomeraja Δf u algoritmu korišćena je vrednost $0.4f_1$.

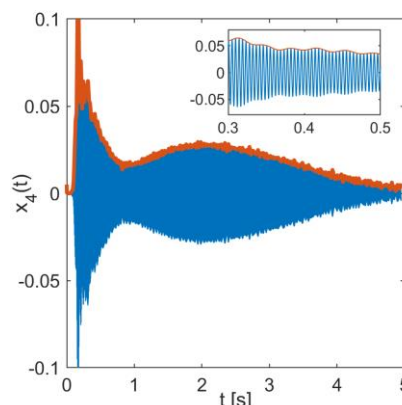
B. Metoda 2 – AR model

AR modelovanje podrazumeva da se na osnovu segmenata signala procene koeficijenti modela. Znajući koeficijente modela, za signale kod kojih su spektralne komponente izražene moguće je izvršiti procenu frekvencija spektralnih komponenti. Iako su za modelovanje audio signala, a posebno tonova muzičkih instrumenata, u literaturi preporučeni ARMA modeli [14], za samu procenu spektra AR modeli su se pokazali kao dovoljno dobar metod. Ujedno, AR modeli su jednostavniji za implementaciju jer se koeficijenti modela mogu izračunati *Yule-Walker*-ovim jednačinama [15]. Podešavanjem reda modela moguće je uticati na tačnost procene spektralnih komponenti.

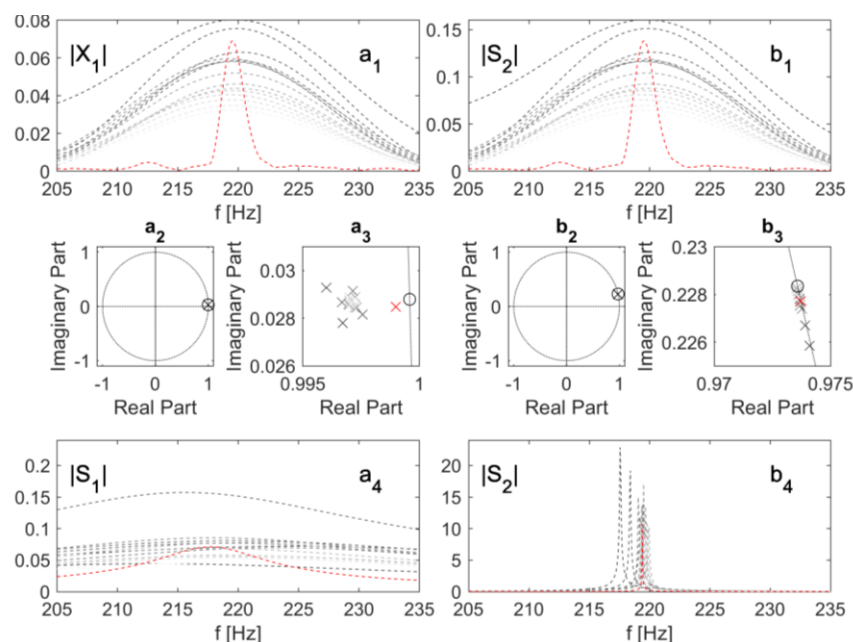
Kao i za slučaj procene spektra metodom DFT analize ulazni podaci algoritma su odbirci audio signala snimljenog tona čembala. Na samom početku potrebno je odrediti red AR modela. Red je empirijski procenjen i variran u zavisnosti od frekvencije pojedinih tonova iz opsega čembala. Zatim je spektar signala podeljen na podopsege čija je širina adekvatna za tri harmonika. Svaki od podopsega je „spušten“ u osnovni opseg i zatim je izvršeno filtriranje i decimacija [14]. Kako faktor decimacije zavisi od osnovne frekvencije tona, korišćene su različite vrednosti faktora decimacije. Krajnji rezultat metode AR modelovanja je procenjivanje frekvencija spektralnih komponenti na osnovu položaja dominantnih polova.

C. Analiza uticaja različitih parametara na procenu spektra

Kako bi se ispitao uticaj različitih parametara na procenu koeficijenta inharmoničnosti biće izvršena analiza signala izdvojenog četvrtog harmonika tona nominalne osnovne frekvencije 55 Hz čiji je segment prikazan na Sl. 2. Signal je izdvojen alatom zasnovanom na digitalnoj komplementarnoj filterskoj banci, pogodnoj za analizu audio signala [16].



Sl. 2. Vremenski oblik četvrtog harmonika tona osnovne frekvencije 55 Hz.



Sl. 3. Uticaj različitih parametara na procenu frekvencije četvrtog harmonika tona nominalne osnovne frekvencije $f_{0N}=55$ Hz. a1) DFT na frekvenciji odabiranja f_s , a2) Polovi AR modela računati na frekvenciji odabiranja f_s , a3) Zumiran detalj slike a2), polovi AR modela, a4) Spektar računat na osnovu modela čiji su polovi prikazani na a2) i a3). b1) DFT na decimiranom signalu. b2) Polovi AR modela računati na decimiranom signalu b3) Zumiran detalj slike b2), polovi AR modela b4) Spektar računat na osnovu modela čiji su polovi prikazani na b2) i b3).

Na Sl. 2 je pored vremenskog oblika četvrtog harmonika crvenom bojom prikazana i njegova anvelopa, dobijena kao moduo Hilbertove transformacije signala. Iako je ovako filtriran signal jednostavniji za analizu, već je na osnovu njegovog vremenskog oblika moguće uočiti određene probleme koji se dodatno usložnjavaju prisustvom većeg broja harmonika. Jedan od problema, koji se može uočiti vizuelnom inspekcijom anvelope harmonika jeste da izdvojeni harmonik nije idealna sinusoida. Činjenica da različiti harmonici istog tona imaju različite anvelope dovodi do toga da u većoj ili manjoj meri njihove anvelope utiču na tačnost procene frekvencije harmonika, a samim tim i na tačnost procene koeficijenta inharmoničnosti. Takođe, signal sa Sl. 2 je u velikoj meri „čist“, jer su filtriranjem potisnuti ostali harmonici, kao i eventualni dodatni šumovi. Kada se analizira ceo ton, to nije slučaj, pa analiza postaje složenija. Ukoliko je cilj da se analiza automatizuje, odnosno bude primenljiva za celokupni registar čembala, postupak se dodatno usložnjava.

Na Sl. 3 prikazani su rezultati dobijeni procenom spektra pomoću dve pomenute metode i za različite parametre za slučaj signala sa Sl. 2. Rezultati sa Sl. 3 koji su označeni slovnim indeksom a) dobijeni su na osnovu obrade signala sa zadatom frekvencijom odabiranja od 48 kHz koja odgovara frekvenciji odabiranja kojom su snimani tonovi čembala. Dok se rezultati koji su označeni slovnim indeksom b) odnose na rezultate dobijene nakon decimacije sa faktorom 8.

U prvom redu Sl. 3, odnosno na graficima a1) i b1) prikazani su amplitudski spektri, rezultati dobijeni DFT analizom. Crnom i sivom bojom je naznačena spektralna komponenta računata na segmentu trajanja 0.1 s sa preklapanjem od 75% i dopunjavanjem nulama do rezolucije od 0.1 Hz. Dok je crvenom bojom rezultat dobijen na osnovu DFT-a sračunatog za prvu sekundu snimljenog signala. Korišćena je *Hamming*-

ova prozorska funkcija. Prikazani su rezultati za nekoliko segmenta signala. Može se uočiti da se pozicije maksimuma, odnosno procene frekvencije harmonika, menjaju od prozora do prozora. Poređenjem Sl. 3 a1) i b1) može se uočiti da decimacija nema značajan uticaj na estimaciju frekvencije.

U drugom redu Sl. 3, na graficima a2), a3), b2) i b3), prikazani su polovi AR modela. Polovi su računati tako da modeluju signal četvrtog harmonika nakon Hilbertove transformacije, pa su dobijeni modeli sa kompleksnim koeficijentima. S obzirom da se analizira samo jedan harmonik, red modela je 1. Na grafiku a2) prikazani su polovi AR modela računati sa frekvencijom odabiranja f_s , dok su na grafiku b2) prikazani polovi AR modela računati na decimiranom signalu. Kružićem je prikazana pozicija na krugu koja odgovara nominalnoj frekvenciji četvrtog harmonika od 220 Hz. Frekvencija od 220 Hz ne predstavlja „tačnu“ vrednost frekvencije četvrtog harmonika, jer tačna frekvencija odsviranog tona nije unapred poznata, već je poznata njena vrednost do nivoa raspona tona. S obzirom na izraz (1) bilo bi očekivano da je dobijena frekvencija zapravo nešto viša od 220 Hz, ali na osnovu prikazanog rezultata može se zaključiti da je osnovna frekvencija odsviranog tona nešto niža od nominalne vrednosti od 55 Hz. Na a3) i b3) prikazani su zumirani detalji sa grafika a2) i b2), respektivno. Crni i sivi krstići predstavljaju polove računate po prozorima dužine 0.1 s, gde se na osnovu slike može uočiti da se pozicija pola menja od prozora do prozora. Crvenom bojom je prikazan pol modela koji je dobijen na osnovu 1 s signala. Ukoliko se izvrši poređenje grafika a3) i b3) može se uočiti da u ovom slučaju decimacija doprinosi boljoj proceni utoliko što je pol pozicioniran bliže jediničnom krugu, pa je njegov efekat izraženiji. Intuitivno je jasno da decimacija doprinosi boljim rezultatima jer, se jedne strane, odbaćen deo spektra koji nije

od interesa, a s druge strane je relativan odnos frekvencije od interesa i frekvencije odabiranja manji, što se vidi i kroz razliku položaja nominalne frekvencije na jediničnom krugu, grafici a2) i b2). U poslednjem redu na graficima a4) i b4), prikazani su spektri dobijeni na osnovu AR modela koji verifikuju zaključak o uticaju decimacije na bolju procenu frekvencije [14].

IV. EKSPERIMENTALNI REZULTATI I DISKUSIJA

Na osnovu analize izložene u prethodnom delu, za dalju diskusiju usvojene su dve metode za procenu spektra, dok je za samu procenu koeficijenta inharmoničnosti korišćen iterativni PFD algoritam [10]. Korišćene su metode DFT analiza i AR modelovanje. Obe metode za procenu spektra su definisane tako da imaju odliku automatske obrade, odnosno da daju vrednosti koeficijenta inharmoničnosti za celokupni registar čembala. Algoritam je testiran na bazi formiranoj za potrebe ovog rada. U bazi se nalaze tonovi snimljeni na 5 različitih registara jednog čembala.

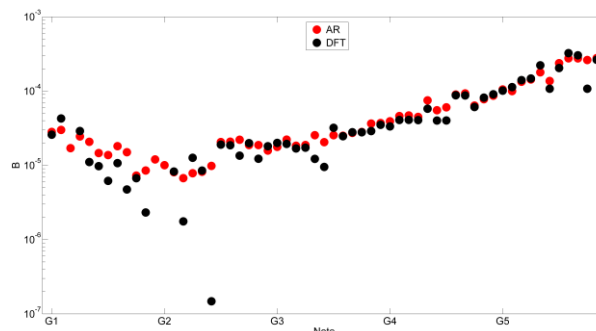
A. Baza snimaka

Za potrebe ovog rada napravljena je baza koju čini 310 snimaka tonova odsviranih u 5 različitih registra čembala. Tonovi čembala su snimljeni u prostorijama Fakulteta muzičke umetnosti u Beogradu. U analizi uticaja tačnosti estimacije frekvencija harmonika na procenu koeficijenta inharmoničnosti korišćeni su tonovi iz prva dva registra. Izabrani su tonovi iz ova dva registra, jer njihova upotreba služi za pojačanje izvođačke dinamike, a ne za menjanje boje instrumenta.

B. Analiza uticaja različitih parametara na tačnost procene koeficijenta inharmoničnosti

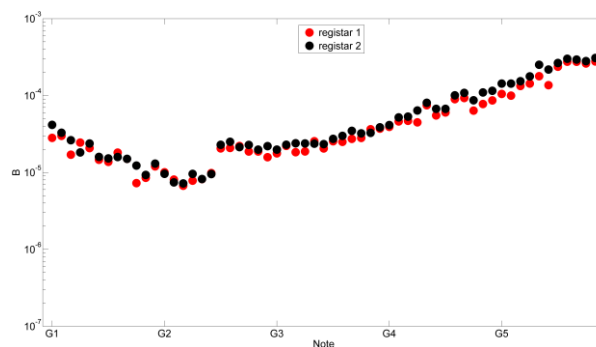
Uticaj tačnosti različitih metoda za estimaciju spektra na procenu koeficijenta inharmoničnosti najbolje se može uočiti poređenjem trenda krive koeficijenta B . Na Sl. 4 prikazan je grafik koeficijenta inharmoničnosti B za celokupan registar čembala procenjen na osnovu dve metode za procenu spektra i to DFT-om i AR modelovanjem. Za tonove iz srednjeg i višeg registra čembala koeficijenti B procenjeni na osnovu dve metode se ne razlikuju značajno, dok za slučaj tonova iz nižeg registra dolazi do razilaženja u vrednostima. Razlog za lošiju procenu koeficijenta B na osnovu metode DFT jeste u proceni osnovne frekvencije tona. Sam iterativni algoritam iako robustan u slučajevima kada u spektru signala nedostaje neki harmonik ili kada je frekvencija pojedinog parcijala pogrešno procenjena, usled pogrešno procenjene osnovne frekvencije tona kao krajnji rezultat daje loše procenju vrednost koeficijenta B . Do pogrešno procenjene osnovne frekvencije tona DFT metodom dolazi zbog samog spektra signala, gde je na nižim frekvencijama često osnovni harmonik potisnut u odnosu na ostale harmonike tog tona. Takođe, pri proceni spektra DFT analizom rezolucija po frekvenijskoj osi je ista za ceo opseg koji se analizira, dok se frekvencije osnovnih tonova menjaju logaritamski, te tačnost procene u muzičkom smislu nije ista u celom opsegu. Metoda AR modelovanjem dala je tačnije rezultate za koeficijent B . Osnovna frekvencija

tona je procenjivana metodom najmanjih kvadrata (*Least square*) nad nekoliko parcijala tona počev od drugog. Time je premošćen problem korišćenje osnovnog parcijala. U najvećem broju snimljenih tonova čembala harmonici nižeg reda su dovoljno jasni, odnosno procena njihovih frekvencija je relativno tačna. Broj harmonika za procenu osnovne frekvencije, kao i broj harmonika na osnovu kojih je izvršena procena parametra B variran je u zavisnosti od visine tona, jer je za tonove nižih frekvencija broj jasno prisutnih harmonika u snimljenom tonu veći.



Sl. 4. Koeficijent inharmoničnosti čembala dobijen metodama: AR i DFT.

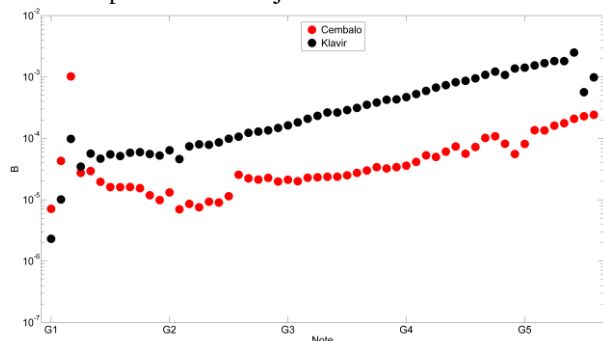
Na Sl. 5 prikazana je kriva koeficijenta inharmoničnosti B za tonove iz prvog i drugog registra čembala. Koeficijenti B su procenjeni na osnovu estimiranih frekvencija harmonika pomoću AR modela. Trend krive koji je očuvan i za tonove iz prvog i drugog registra čembala verifikuje tačnost estimacije frekvencija harmonika koja je dobijena na osnovu AR modela.



Sl. 5. Koeficijenti inharmoničnosti čembala iz prvog i drugog registra.

S obzirom da se tonovi čembala u spektru odlikuju većim brojem harmonika u odnosu na tonove klavira istih frekvencija, izvršeno je poređenje koeficijenta B za tonove čembala u odnosu na koeficijent B za tonove klavira posmatrane na istom frekvenijskom opsegu. Na Sl. 6 prikazani su koeficijenti inharmoničnosti tonova čembala iz prvog registra i polukoncertnog klavira Steinway D7. Na osnovu slike se može zaključiti da postoji sličan trend krive koeficijenta B za oba instrumenta, iako se ova dva instrumenta razlikuju na osnovu načina nastanka tona. Kod tonova čembala, vrednosti koeficijenta B su manje za red veličine. Pored velikog broja harmonika tonova čembala u odnosu na klavir, postoji još jedna razlika između ova dva instrumenta koja doprinosi velikim odstupanjima koeficijenta inharmoničnosti. Kod klavira u većinskom frekvenijskom

opsegu jednom tonu odgovaraju tri žice, dok čembalo za svaki ton ima jednu. S obzirom na postojanje tri žice kod klavira, koje se vide u spektru signala, pri proceni spektra uvek se donosi odluka na osnovu jedne spektralne komponente na osnovu čije frekvencije se ulazi u dalju procenu koeficijenta inharmoničnosti. Tim fenomenom se otvaraju nove potrebe u smislu modelovanja uticaja tri žice na procenu spektra, a samim tim i procenu koeficijenta inharmoničnosti.



Sl. 6. Koeficijent inharmoničnosti B tonova čembala i klavira.

V. ZAKLJUČAK

U ovom radu razmatran je uticaj procene frekvencija harmonika na tačnost procene koeficijenta inharmoničnosti. Formirana je baza snimaka koja se sastoji od preko 300 tonova odsviranih na čembalu. Čembalo je izabrano kao instrument za analizu, jer se spektri njegovih tonova odlikuju velikim brojem harmonika. Prisutnost velikog broja parcijala u spektru tona je značajna, zbog činjenice da su fizičke pojave koje opisuju fenomen inharmoničnosti uočljivije na višim parcijalima tona. Sem toga sa prisustvom većeg broja harmonika iterativni algoritam bolje procenjuje koeficijent inharmoničnosti. Izvršena je uporedna analiza dve metode za procenu spektra signala i to procena spektra na osnovu AR modela i metodom DFT. Pokazano je da je procenu frekvencije harmonika bolje vršiti na osnovu AR modela, nego metodom DFT, jer trend krive procenjenih koeficijenata inharmoničnosti u tom slučaju ima konzistentnije ponašanje. Poređenjem, koeficijenta inharmoničnosti tonova klavira i čembala uočeno je da na njihove vrednosti između ostalog utiče i broj žica koji je potreban za sviranje jednog tona. Dalja unapređenja postupka za procenu koeficijenta inharmoničnosti biće predlog rešenja za modelovanje uticaja prisustva više žica na koeficijent inharmoničnosti. Izvedeni zaključci su korisni za buduća istraživanja gde će se na ovaj način procenjeni koeficijenti inharmoničnosti koristiti u sintezi i modelovanju tonova žičanih instrumenata koje će predstavljati osnovu subjektivnih testova. Cilj subjektivnih testova bi bio upotpunjavanje istraživanja o uticaju inharmoničnosti žičanih instrumenata na ljudsku percepciju tonova.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je realizovan u okviru projekta TR36026 koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. Zahvaljujemo se kolegama sa Fakulteta muzičke umetnosti na ustupljenim muzičkim instrumentima i formiranju baze snimaka.

LITERATURA

- [1] J. W. Strutt, *The Theory of Sound*, Macmillan 1894.
- [2] R.W. Young, "Inharmonicity of Plain Wire Piano Strings", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 24, no. 3, pp. 267–273, 1952.
- [3] H. Fletcher, E. D. Blackham, and R. Stratton, "Quality of piano tones", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 34, no. 6, pp. 749–761, 1962.
- [4] H. Fletcher, "Normal Vibration Frequencies of a Stiff Piano String", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 36, no. 1, pp. 203–209, 1964.
- [5] A.S. Galembo, and A. Askenfelt, A. "Signal representation and estimation of spectral parameters by inharmonic comb filters with application to the piano," *IEEE Trans. Speech Audio Process*, vol. 7, no. 2, pp. 197–203, 1999.
- [6] A. Askenfelt and A.S. Galembo, "Study of the spectral inharmonicity of musical sound," *Acoust. Phys.* vol. 46, no. 2, pp. 121–132, 2000.
- [7] A. Klapuri, "Multiple fundamental frequency estimation based on harmonicity and spectral smoothness," *IEEE Trans. Speech Audio Process*, vol. 11, no. 6, pp. 184–194, 2003.
- [8] J. Rauhalu, H.M. Lehtonen, V. Välimäki, "Fast automatic inharmonicity estimation algorithm" *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 121, EL184, doi: 10.1121/1.2719043, 2007.
- [9] T. Miljković, M. Bjelić, D. Šumarac Pavlović, J. Čertić, "Analiza algoritma za procenu koeficijenta inharmoničnosti različitih klavira", *Zbornik radova 64. Konferencije ETRAN*, pp. AK1.2.1 - AK1.2.6, Beograd, Sep, 2020.
- [10] D. Despić, *Muzički instrumenti*, Univerzitet umetnosti Beograd, 1979.
- [11] A. Bond, *A Guide to the Harpsichord*, Portland, USA, Amadeus Press, 1997.
- [12] S. Dixonb, M. Mauch, and Dan Tidhar "Estimation of harpsichord inharmonicity and temperament from musical recordings", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 131, no. 1, Pt. 2, pp. 878–887, Jan 2012.
- [13] H.M. Lehtonen "Analysis of Piano Tones using an Inharmonic Inverse Comb Filter", *Proc. of the 11th Int. Conference on Digital Audio Effects (DAFx-08)*, Espoo, Finland, September 1-4, 2008.
- [14] P.A.A. Esquef, M. Karjalainen, and V. Välimäki, "Frequency-Zooming ARMA Modeling for Analysis of Noisy String Instrument Tones", *EURASIP J. Adv. Signal Process*, pp. 953-967, 2003.
- [15] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, 4th ed. New Jersey, USA, Prentice Hall, 2002.
- [16] J. Čertić, D. Šumarac Pavlović, I. Salom, "Softverski paket za obradu i analizu audio signala", *TELFOR 2010*, pp. 1269-1272, Beograd, Nov., 2010.

ABSTRACT

Inharmonicity is a phenomenon that occurs in musical instruments that are theoretically considered harmonic, and it is the deviation of the frequencies of the tone partials from the integer multiple of the fundamental frequency. For stringed musical instruments, the inharmonicity coefficient is defined in the literature as a measure of deviation from the ideal case. In the previous research work, it was shown that an automatic algorithm for estimating the inharmonicity coefficient of piano tones, for individual tones from the register doesn't perform a good estimation of the inharmonicity coefficient. In this paper, the accuracy impact of harmonics frequency estimation on the estimation of inharmonicity coefficient is considered. Comparative analysis of two methods for signal spectrum estimation was performed, namely spectrum estimation based on AR model and DFT method. Testing of the proposed methods for spectrum estimation was performed on real harpsichord tones. It was found that based on the trend of the inharmonicity coefficient calculated using both spectrum estimation methods, the AR model method is superior and performs a more accurate estimation of the inharmonicity coefficient over the whole range of tones of interest.

Impact of harmonic frequency estimation on the estimation of harpsichord inharmonicity coefficient

Tatjana Miljković, Jovana Damjanović, Jelena Čertić,
Dragana Šumarac Pavlović