

Subjektivna ocena različitih metoda sinteze muzičkih tonova sa izraženom inharmoničnošću

Tatjana Miljković, Jelena Čertić, Dragana Šumarac Pavlović

Apstrakt— U ovom radu analizirani su različiti načini sinteze tonova harfe. Na osnovu subjektivnih testova izvršena je procena prirodnosti sintetizovanih tonova. Tonovi se sintetišu na osnovu parametara estimiranih iz realno snimljenih tonova različite visine i izražene inharmoničnosti. U radu je predložena metoda za sintezu koja treba da omogući nezavisno podešavanje različitih parametara signala uključujući vremensku i spektralnu anvelopu i koeficijent inharmoničnosti. Na osnovu rezultata subjektivnih testova izabrana je metoda sinteze koja će biti korišćena u daljim istraživanjima uticaja inharmoničnosti na percepciju tonova muzičkih instrumenata.

Ključne reči—Inharmoničnost; harfa; subjektivni test; sinteza.

I. UVOD

Ton karakteriše diskretan spektar čije se komponente nalaze na celobrojnim umnošcima osnovne frekvencije. Poznato je da se takve komponente nazivaju harmonici. Međutim, kod žičanih muzičkih instrumenata, komponente koje čine jedan ton ne nalaze se na celobrojnim umnošcima osnovne frekvencije. Opisana pojava naziva se inharmoničnost. U literaturi je poznato da parametri koji utiču na ovaj fenomen jesu: konstrukcija instrumenta, dužina i materijal žice, način okidanja žice, kao i način na koji je žica pričvršćena za telo instrumenta [1,2,3].

Saznanja vezana za same fizičke procese koji su uzročnici nastanka inharmoničnosti dovela su do razvijanja različitih algoritama i procedura za izračunavanje koeficijenta inharmoničnosti [4,5,6,7]. Samim razvojem automatskih procedura pojavila se mogućnost da se izvrši karakterizacija žičanih instrumenata na osnovu koeficijenta inharmoničnosti. Pored toga što je moguće izvršiti karakterizaciju žičanih instrumenata, ustanovljeno je da inharmoničnosti predstavlja i kvalitativan parametar koji utiče na percepciju tonova klavira [8]. Time je nastala potreba da se sprovedu različiti subjektivni testovi kako bi se ispitao uticaj inharmoničnosti na ljudsku percepciju tonova. Takva istraživanja sprovedena su uglavnom na sintetisanim tonovima klavira [9,10].

S obzirom na to da je inharmoničnost fenomen koji se javlja prilikom nelinearnih procesa u oscilacijama zategnutih

žica, njeno pojavljivanje se može uočiti ne samo kod tonova klavira već i drugih žičanih muzičkih instrumenata. U prethodnim istraživačkim radovima [11,12,13], pored procene koeficijenata inharmoničnosti tonova klavira sprovedene su procene i za tonove čembala i harfe. Takođe, razvijeni su softverski alati za objektivnu analizu, ekstrakciju parametara i procenu koeficijenta inharmoničnosti snimljenih realnih signala žičanih instrumenata. Kako je pokazano da inharmoničnost tonova klavira utiče na percepciju istih, razvijeni su i alati za sintezu signala, s ciljem da se pomoću njih izvrši sinteza tonova i drugih žičanih instrumenata koji su bili predmet objektivnih analiza u prethodnim istraživanjima.

U ovom radu prikazana su 4 različita načina sinteze tonova harfe koji se baziraju na principima aditivne sinteze. Harfa je izabrana kao instrument čiji će se tonovi sintetisati, jer se njeni tonovi odlikuju skokovitom promenom koeficijenta inharmoničnosti u funkciji visine tona, odnosno pobuđene žice, što je posledica toga što se koriste žice od različitih materijala (metal i crevo). Tonovi su sintetisani na osnovu parametara procenjenih iz realno snimljenih tonova harfe različitih visina i izražene inharmoničnosti. Ideja rada je da se subjektivnim testiranjem utvrdi koji od 4 predložena tipa sinteze zvuči najprirodnije, kako bi u nastavku istraživanja mogao da se ispituje uticaj inharmoničnosti na percepciju tonova različitih instrumenata. Time bi se pri sledećim subjektivnim testiranjima eliminisalo pitanje o prirodnosti sinteze tonova, već bi akcenat bio isključivo na uticaju inharmoničnosti na percepciju tonova žičanih muzičkih instrumenata.

Rad je organizovan kako sledi. U drugom poglavlju rada prikazana je metodologija formiranja različitih tipova sinteze tonova harfe, kao i postupak sprovedena subjektivnog testiranja. U narednom poglavlju dat je prikaz rezultata subjektivnog testiranja i izvršena je diskusija ostvarenih rezultata. Na kraju, izneti su zaključci do kojih se došlo u ovom istraživanju i dati su predlozi za sledeće etape istraživanja.

II. METODOLOGIJA

U ovom radu, sprovedeni su subjektivni testovi u odnosu na sintetisane tonove koji su formirani na četiri različita načina, ali sa osnovnom idejom da se zadrži koeficijent inharmoničnosti originalnog, snimljenog signala. Sva četiri načina sinteze podrazumevaju očuvanje parametara snimljenog signala, te se može konstatovati da je cilj subjektivnog testiranja upravo da se proceni koji od načina najbolje zadovoljava taj uslov. U ovom poglavlju objašnjen je

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

način formiranja signala, kao i metodologija subjektivnih testova.

A. Formiranje test signala

Test signali koji su predmet subjektivnog testiranja sintetisani su na osnovu parametara dobijenih estimacijom realno snimljenih signala. Signali su snimljeni na Fakultetu Muzičke umetnosti u Beogradu, za potrebe prethodnog istraživanja [13].

Za analizu signala, kao i za procenu parametara signala, korišćena je dvostruko komplementarna IIR filtarska banka analize sa faznom korekcijom [14]. Primenom ove banke, signal se dekomponuje na kanale čije centralne frekvencije odgovaraju frekvencijama parcijala, harmonika sa uračunatim pomerajem usled inharmoničnosti. Za podešavanje filtarske banke, korišćene su prethodno određene vrednosti koeficijenta inharmoničnosti.

U ovom radu, kao test signali, korišćeni su signali dobijeni sintezom na sledeći način:

$$x[n] = \sum_{k=1}^N p_k a_k[n] \sin\left(2\pi \frac{f_k}{f_s} n + \varphi_k\right) + r_l[n] + r_h[n], \quad (1)$$

gde je N , broj harmonika signala koji su korišćeni pri sintezi, p_k – parametar koji ima vrednost 1 ili 0 i koji praktično „uključuje“ ili isključuje harmonik k iz sume, $a_k[n]$ – vremenska anvelopa k -tog harmonika, f_k – frekvencija k -tog harmonika, φ_k – početna faza k -tog harmonika, r_l – opcioni deo, komponente signala iz opsega ispod najnižeg harmonika i r_h – opcioni deo, komponente signala iz opsega iznad najvišeg harmonika.

Anvelope svakog od harmonika dobijene su na osnovu signala na izlazu odgovarajućeg kanala dvostruko komplementarne filtarske banke analize sa faznom korekcijom [12]:

$$a_k[n] = \sqrt{x_{ok}^2[n] + \hat{x}_{ok}^2[n]}, \quad (2)$$

gde su $x_{ok}[n]$ i $\hat{x}_{ok}[n]$, redom, signal na izlazu iz kanala filtarske banke koji odgovara k -tom harmoniku i njegova Hilbertova transformacija.

Frekvencije harmonika određene su uzimajući u obzir koeficijent inharmoničnosti, kao:

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

gde je k – redni broj harmonika, B – koeficijent inharmoničnosti i f_0 – osnovna frekvencija tona. Metodologija procene parametara B i f_0 za tonove harfe koji su predmet ovog rada, prikazani su u našem prethodnom radu [13].

Početna faza za svaki harmonika određena je kao faza dominantne komponente u spektru odgovarajućeg filtriranog signala $x_{ok}[n]$.

Za svaki od tonova harfe na osnovu objektivnih parametara, spektra signala i vremenskih oblika signala na izlazima iz filtarske banke analize, procenjen je broj harmonika N koji su uzeti u obzir pri sintezi. U pojedinim slučajevima, preskočeni su, odnosno nisu uključeni u sumu (1) i harmonici rednih brojeva manjih od N , ukoliko je na osnovu objektivnih parametara taj harmonik ocenjen kao nedostajući, odnosno p_k

postavljeno na 0. Parametar p_k računat je na osnovu niza X_{ok} , spektra određenog diskretnom Furijeovom transformacijom – DFT odgovarajućeg filtriranog signala $x_{ok}[n]$. Parametar p_k

postavljen je na 0 ukoliko je odnos maksimalne i srednje vrednosti spektra signala ispod empirijski određenog praga. U nekim varijantama sinteze, osim sume koja uključuje harmonike, sintetisan signal sadrži i komponente snimljenog signala koje su ispod i/ili iznad frekvencijskog opsega obuhvaćenog sumom, koje su u (1) označene sa r_l i r_h . Ove dodatne komponente treba da doprinesu utisku prirodnosti signala.

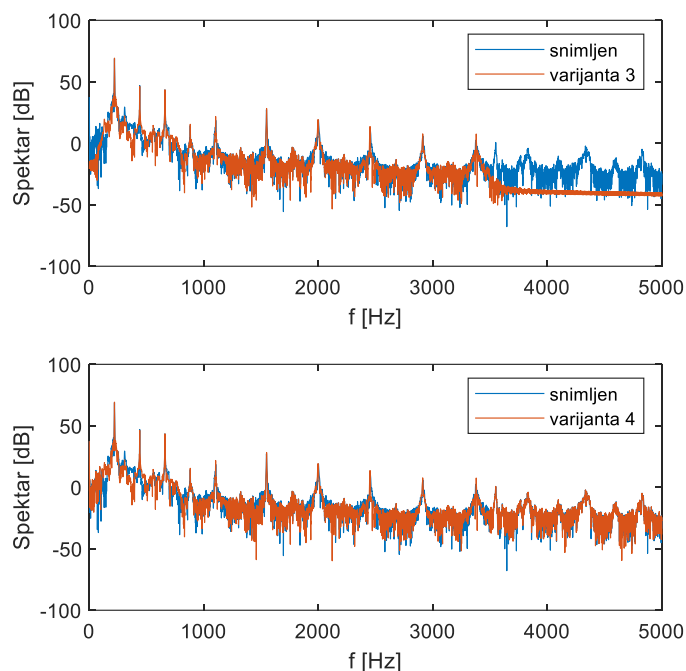
Za subjektivne testove čiji su rezultati prikazani u ovom radu, izabrane su četiri varijante sintetisanih signala za tri tona različitih visina. Izabrane su varijante koje na osnovu objektivnih parametara najmanje odstupaju od originalnog snimljenog signala. U preliminarnim testiranjima u kojima su učestvovali kolege koje se profesionalno bave snimanjem zvuka, postavilo se pitanje uticaja šuma kvantizacije i brzine opadanja nedominantnih harmonika na ukupan utisak prilikom slušanja sintetisanih tonova. Imajući sve to u vidu, formiran je konačan skup test signala za svaki od izabranih tonova:

- Varijanta 1 (V1) - Originalno snimljen signal,
- Varijanta 2 (V2) - Signal dobijen po formuli (1) sa uključenim r_l i r_h i snimljen kao 16-to bitni signal,
- Varijanta 3 (V3) - Signal dobijen po delu formule (1) koji uključuje samo sumu, bez r_l i r_h , i snimljen kao 24-to bitni signal,
- Varijanta 4 (V4) - Signal dobijen po formuli (1) sa uključenim r_l i r_h i snimljen kao 24-to bitni signal,
- Varijanta 5 (V5) - Signal dobijen po formuli (1) sa uključenim r_l i r_h i snimljen kao 24-to bitni signal, kod koga su nedominantni harmonici dodatno potisnuti tako da brže opadaju.

Predloženi skup varijanti sinteza u odnosu na klasičnu aditivnu sintezu razlikuje se u atributima dodatim kako bi se postigao utisak što prirodnijeg signala. Atributi koji su korišćeni jesu: parametar p_k i komponente signala iz opsega ispod i iznad najnižeg odnosno najvišeg harmonika, r_l i r_h respektivno. Značaj pomenutih atributa na sintezu signala može se uočiti upoređivanjem spektra sintetisanih signala i originalno snimljenog signala. Na slici 1 prikazani su spektri sintetisanog signala tona A3 za dva slučaja sinteze.

Na gornjoj slici dat je slučaj, označen kao varijanta 3, kada nisu uključene komponente r_l i r_h . Na osnovu slike se može zaključiti da u odnosu na snimljeni ton, sintetisana varijanta 3 se ne odlikuje bogatstvom spektralnih komponenti u frekvencijskom opsegu ispod i iznad prvog i poslednjeg harmonika koji je uračunat u sintezu. Na donjoj slici dat je slučaj, označen kao varijanta 4, kada su u sintezu uključene i komponente r_l i r_h . Poređenjem gornjih i donjih spektara uočava se da varijanta 4 predstavlja verniju varijantu sinteze originalnog signala, kada se spektralni sadržaj posmatra kao objektivni parametar. Takođe, u spektru snimljenog signala prikazanom na slici 1, može se uočiti da harmonici pod rednim brojevima 6, 8, 10 i 11 nedostaju. Njihov nedostatak u

obe varijante sinteze modelovan je pomoću parametra p_k .



Sl. 1. Spektri sintetisanih signala tona A3 u poređenju sa spektrom snimljenog signala tona A3 za dva slučaja sinteze.

Tonovi D2, A3 i H4, koji će biti predmet sinteze izabrani su tako da se odlikuju različitim tonskim visinama. Pored toga što se tonovi razlikuju u tonskoj visini, razlikuju se i po koeficijentu inharmoničnosti. Naročita razlika je između tona D2 i tonova A3 i H4, jer se ton D2 proizvodi na metalnoj žici, a tonovi A3 i H4 na crevnim žicama. Svaki od navedena tri tona sintetisan je na 4 pomenuta načina sinteze. U Tabeli I, dati su parametri korišćeni pri sintezi za svaki ton. Vrednosti koeficijenata inharmoničnosti prikazane u tabeli određene su u prethodnom istraživačkom radu grupe autora, koji je baziran na objektivnoj karakterizaciji harfe kroz prizmu koeficijenta inharmoničnosti [13]. Broj korišćenih harmonika je eksperimentalno određen kao broj na osnovu kojeg se može izvršiti pouzdana procena koeficijenta inharmoničnosti B [13]. Iako je prirodna tendencija tonova da pri višim osnovnim frekvencijama, broj harmonika u spektru signala opada za ton A3 korišćen broj harmonika je nešto manji u odnosu na broj harmonika upotrebljenog za sintezu tona H4. Razlog toga je što se u spektru snimljenog signala tona A3 javljaju izražene parazitne diskretne komponente [13] koje mogu uticati na tačnost procene parametara signala, te je taj deo frekventijskog opsega namerno izbegnut.

TABELA I
PARAMETRI SIGNALA KORIŠĆENI PRI SINTEZI

Ton	N	f_0 [Hz]	B
D2	25	73.394	6.92e-5
A3	15	220.077	2.13e-4
H4	18	494.908	3.10 e-4

B. Metoda testiranja i ispitani

Subjektivni test je sproveden kao AB test, gde je ispitanik naizmenično i proizvoljan broj puta imao mogućnost da sluša signal A i signal B pre nego što donese odluku. Ispitanik je donosio odluku tako što je odgovarao na pitanje "Šta je prirodnije?", gde je u ponuđenim odgovorima imao tri opcije A, B i jednako. Odnosno, ukoliko se ispitanik odluči za soluciju A to znači da mu je signal A zvučao prirodnije u odnosu na signal B, dok se solucija jednako odnosi na to da signali A i B zvuče jednako prirodno.

S obzirom da su predmet subjektivnih testova bila 3 tona (D2, A3 i H4) i da za svaki ton postoji 5 različitih kombinacija signala, ukupan broj kombinacija bez ponavljanja mogućih za slušanje u tom slučaju bio je 30. Međutim, osim 30 signala koji predstavljaju različite kombinacije sintetisanih tonova u test je uključena i kontrolna grupa signala. Kontrolna grupa signala je zapravo predstavljala slučaj kada su kao signali A i B puštani isti signali, npr. Signal A (ton D2 – varijanta 2) i Signal B (ton D2 – varijanta 2). Takvih signala u kontrolnoj grupi je bilo 15, što bi značilo da je ukupan broj signala za testiranje koje su ispitanici morali da preslušaju bio 45. U subjektivno testiranje kontrolna grupa sintetisanih signala je uključena kako bi se sprovedla analiza o kredibilitetu slušača. Za slučaj da se ispitanik u više od 20% kombinacija za signale iz kontrolne grupe izjasni da signali A i B nisu jednaki, rezultati tog ispitanika neće biti uzet u razmatranje.

Ukupan broj ispitanika koji je učestvovao u testiranju je 39. Svih 39 ispitanika pripadaju starosnoj dobi od 20 do 35 godina. Na osnovu rezultata dobijenih analizom samo rezultata signala iz kontrolne grupe, ustanovljeno je da su svi ispitanici imali manje od 20% pogrešnih odgovora, što ih kvalifikuje da rezultati njihovih testiranja budu deo konačnih analiza sprovedenog subjektivnog testa. Ispitanici su podeljeni u dve grupe, prvu grupu je činilo 15 ispitanika koji imaju formalno muzičko obrazovanje, dok ostala 24 ispitanika spadaju u drugu grupu ljudi koji nemaju muzičko obrazovanje.

Subjektivno testiranje je izvršeno u prostorijama Laboratorije za Akustiku na Elektrotehničkom fakultetu. Ispitanici su slušali u kontrolisanim i za sve jednakim uslovima. Zarad uticaja na kvalitet zvuka samih signala njihova reprodukcija je omogućena uz audio karticu Yamaha Steinberg UR 22 [15], kao i AKG K92 slušalice [16]. S obzirom da nivo signala ne utiče na rezultate subjektivnog testiranja ove vrste, ispitanici su imali slobodu da po sopstvenom nahođenju prilagode nivo zvuka prilikom slušanja testa.

III. EKSPERIMENTALNI REZULTATI I DISKUSIJA

Kako je predmet ovog rada subjektivni test koji se vezuje za oblast muzičke akustike, očekuje se da će se rezultati muzički obrazovanih ispitanika razlikovati od ispitanika koji nemaju muzičko obrazovanje. Stoga su rezultati samog testiranja podeljeni na dve slike, sliku 2 na kojoj su prikazani rezultati testiranja svih ispitanika i sliku 4, koja se odnosi na

rezultate testa samo muzički obrazovanih ispitanika. Zbog preglednosti rezultata obe slike su podeljene na 3 matrice, gde se svaka matrica (a,b,c) odnosi na dobijene rezultate za odgovarajući ton, D2, A3 i H4 respektivno. Princip tumačenja rezultata je isti za svaku matricu i biće objašnjen na osnovu slike 2 a) za ton D2. S obzirom da svaki ton ima 5 varijanti signala (original i 4 načina sinteze), broj 61.5 koji se nalazi u polju (2,3) matrice koja odgovara tonu D2, tumači se tako da je 61.5 % ispitanika reklo da je varijanta 2 tona D2 prirodnija u odnosu na varijantu 3 tona D2. Takođe, zbog preglednosti rezultata, polja u matricama su obojena u gradijentnom valeru boja, počevši od crvene, ka narandžastoj, zatim žutoj i na kraju zelenoj, gde crvena boja odgovara najlošijem ostvarenom procentu, a zelena najboljem.

Zbirni rezultati testa koji se odnose na rezultate svih ispitanika nalaze se na slici 2. Ukoliko posmatramo istovremeno rezultate dobijene za sva 3 tona, postoji nekoliko zaključaka za vrednosti rezultata koje se održavaju bez obzira na tonsku visinu. Za slučaj varijante 2 sintetisanih tonova, ona je bolja od varijante 1 i varijante 3, a lošija u odnosu na varijantu 4 i 5. Činjenica da se u proseku 60% ispitanika odlučilo da je varijanta 2 bolja od varijante 1, odnosno originala, potvrđuje da je generalni način aditivne sinteze sa ekstrahovanim parametrima iz originalnog signala dobar. Takođe, konstatovanjem da se samo oko 20% ispitanika opredelilo za varijantu 2 umesto varijantu 4, govori u prilog činjenici da broj bita igra bitnu ulogu u sintezi, s obzirom da je jedina razlika pri sintezi varijanata 2 i 4 upravo u broju bita. S obzirom da je varijanta 2 superiornija jedino u odnosu na varijantu 3, ne možemo tvrditi da je ona i najpogodnija verzija sintetisanog tona harfe.

Varijanta 3, koja se sastoji samo od predefinisano broja harmonika za dati ton i njima pridruženih anvelopa, ostvarila je najlošije rezultate u odnosu na sve ostale varijante sinteze. Time je pokazano, da za prirodnost sintetisanog tona nije dovoljan samo broj harmonika koji je procenjen na osnovu spektra i vremenskog oblika signala, već je potrebno dodati i komponente signala koje se nalaze u frekvencijskom opsegu ispod najnižeg i iznad najvišeg uračunatog harmonika za sintezu signala. Međutim, za slučaj tona H4, najvišeg po frekvenciji, varijanta 3 nije dala tako loše rezultate, ostvarivši oko 40% u odnosu na varijante 1, 2 i 4. Razlog za bolje rezultate ostvarene kod tona H4 u odnosu na tonove D2 i A3, je u tome što ton H4 s obzirom da je više frekvencije u odnosu na pomenute tonove poseduje spektar koji po prirodi stvari nema veliki broj harmonika. Samim tim varijanta 3 koja obuhvata samo predefinisano broj harmonika, može doći u obzir pri sintezi tonova harfe samo iz višeg tonalnog registra.

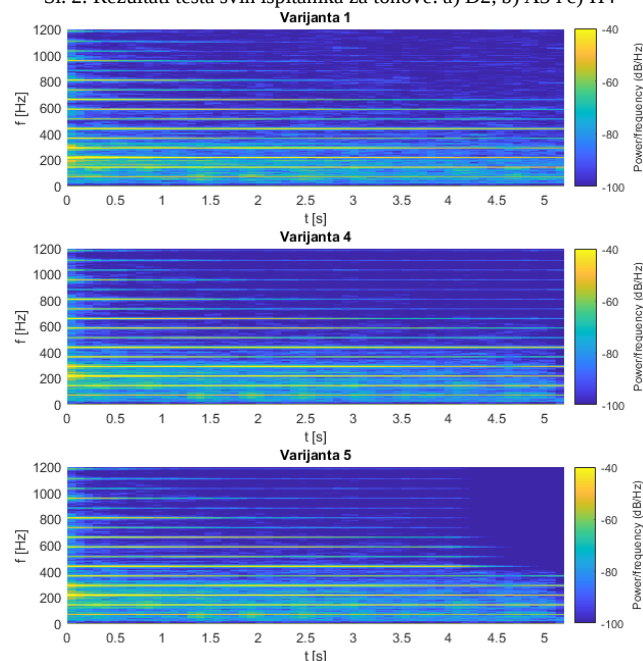
Posmatranjem rezultata za tonove D2 i A3, varijanta 4 sinteze je bolja u odnosu na varijante 1, 2 i 3, dok je varijanta 5 procentualno bolja u odnosu na varijantu 4. Za slučaj tona H4 varijanta 5 je ostvarila veći procenat u odnosu na sve varijante sinteze, što implicira da su se ispitanici odlučili da je varijanta 5 sinteze najprirodnija. Razlog zašto je varijanta sinteze pod rednim brojem 5 ostvarila najbolje rezultate u poređenju sa ostalima se može objasniti na osnovu slike 3.

a)	V1	V2	V3	V4	V5
V1	100	35.9	71.8	33.3	33.3
V2	64.1	100	61.5	17.9	33.3
V3	28.2	38.5	100	25.6	25.6
V4	66.7	82.1	74.4	100	25.6
V5	66.7	66.7	74.4	74.4	100

b)	V1	V2	V3	V4	V5
V1	100	33.3	76.9	35.9	20.5
V2	66.7	100	71.8	20.5	20.5
V3	23.1	28.2	100	10.3	20.5
V4	64.1	87.2	89.7	100	23.1
V5	79.5	79.5	79.5	76.9	100

c)	V1	V2	V3	V4	V5
V1	100	38.5	61.5	56.4	43.6
V2	61.5	100	53.8	38.5	15.4
V3	46.2	46.2	100	41.0	28.2
V4	43.6	61.5	59.0	100	23.1
V5	56.4	84.6	71.8	76.9	100

Sl. 2. Rezultati testa svih ispitanika za tonove: a) D2, b) A3 i c) H4



Sl. 3. Spektrogrami tona D2 snimljenog signala (varijanta 1) i sintetisanog na osnovu varijanata 4 i 5

Na slici 3 prikazana su 3 spektrograma tona D2, spektrogram koji odgovara snimljenom tonu (varijanta 1) i spektrogrami koji odgovaraju signalima sintetisanim na osnovu varijanata 4 i 5. Ukoliko poredimo spektrograme koji odgovaraju varijanti 1 i varijanti 4 tona D2, u frekventijskom opsegu od 800 do 1200 Hz i u vremenskom intervalu od 4 do 5 s, možemo primetiti da su kod spektrograma signala varijante 1 u tim granicama harmonici signala oslabljeni, dok se u istim granicama kod spektrograma signala varijante 4 energije harmonika održavaju. Upravo to energetske održavanje harmonika u spektrogramu varijante 4 je ono što čini taj tip sinteze manje prirodnim, jer se očekuje da nakon nekog vremena energija viših harmonika opada, što se može uočiti na spektrogramu signala varijante 1 (snimljen signal). Poređenjem istog dela spektrograma signala varijante 5, u pomenutom frekventijskom i vremenskom opsegu, vidi se da su harmonici energetske oslabljeni i da spektrogram tako sintetisanog signala više nalikuje spektrogramu varijante 1. Na osnovu prethodno sprovedene objektivne analize, možemo konstatovati da su rezultati dobijeni subjektivnim testiranjem validni. Time je utvrđeno da je sinteza koja odgovara varijanti 5 najprirodnija i da će u narednim istraživanjima za sintetisanje tonova žičanih instrumenata upravo ona biti korišćena.

a)	V1	V2	V3	V4	V5
V1	100	28.6	92.9	28.6	50
V2	71.4	100	64.3	7.1	28.6
V3	7.1	35.7	100	7.1	14.3
V4	71.4	92.9	92.9	100	28.6
V5	50	71.4	85.7	71.4	100

b)	V1	V2	V3	V4	V5
V1	100	50	92.9	42.9	28.6
V2	50	100	78.6	14.3	21.4
V3	7.1	21.4	100	0	14.3
V4	57.1	85.7	100	100	28.6
V5	71.4	78.6	85.7	71.4	100

c)	V1	V2	V3	V4	V5
V1	100	71.4	85.7	35.7	50
V2	28.6	100	64.3	35.7	14.3
V3	14.3	35.7	100	14.3	28.6
V4	64.3	64.3	85.7	100	28.6
V5	50	85.7	71.4	71.4	100

Sl. 4. Rezultati testa muzički obrazovanih ispitanika za tonove: a) D2, b) A3 i c) H4

Rezultati testa koji se odnose samo na muzički obrazovane ispitanike prikazani su na slici 4. S obzirom da se na slici 2 nalaze zbirni rezultati svih ispitanika (samim tim i rezultati muzički obrazovanih), zaključci izvedeni u prethodnom potpoglavlju preslikavaju se i na rezultate prikazane na slici 4. Najveća razlika u odnosu na zbirne rezultate prikazane na slici 2 može se uočiti kod sintetisanog signala varijante 3. Relativno mali procenti u korist varijante 3 mogu se objasniti time da je kod muzički obrazovanih ispitanika bogatstvo harmonika upravo ono što opisuje prirodnost nekog tona.

IV. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazani su i analizirani različiti načini sinteze tonova harfe. Prvobitno je urađena estimacija objektivnih parametara koji opisuju tonove harfe kao što su: vremenska i spektralna anvelopa signala, broj dominantnih harmonika i koeficijent inharmoničnosti. Sinteza tonova harfe se bazira na principu aditivne sinteze, pri čemu je svakoj sinusoidi pridružena procenjena anvelopa posmatranog harmonika, kao i odgovarajuća procenjena frekvencija harmonika sa uračunatom inharmoničnošću. Formirana su 4 različita načina za sintezu signala. Cilj ovog rada bio je da se subjektivnim testiranjem utvrdi koji od načina sinteze, prema stavu ispitanika, najvernije predstavlja prirodan ton harfe. Najlošije rezultate testa ostvarila je varijanta 3 sintetisanog signala, samo oko 30% ispitanika se odlučilo da ona zvuči prirodnije u odnosu na druge varijante. Rezultati testa su pokazali da pri sintezi signala nije dovoljno uključiti samo predefinisani broj harmonika tona sa njima pridruženim anvelopama, već je neophodno dodati i komponente originalnog signala. Takođe, pokazano je da broj bita sa kojim se snima signal utiče na rezultate, odnosno oko 80% ispitanika je reklo da je sintetisani signal snimljen sa 24 bita bolji u odnosu na signal sintetisan sa istim parametrima samo snimljen sa 16 bita. Najbolje rezultate subjektivnog testiranja ostvarila je varijanta 5 sintetisanog signala. 75% ispitanika se izjasnilo da je varijanta 5 najprirodnija i taj procenat je održan za sva tri tona. Time je verifikovano da taj tip sinteze može da se koristi za ceo opseg tonova harfe. U narednim istraživanjima kao početni signal korišće se sintenisan signal varijantom 5, čiji će parametri biti varirani u cilju ispitivanja uticaja inharmoničnosti na percepciju tonova žičanih muzičkih instrumenata.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva za nauku, tehnološki razvoj i inovacije Republike Srbije pod brojem ugovora: 451-03-47/2023-01/ 200103.

LITERATURA

- [1] John William Strutt, Lord Rayleigh, *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, "Normal Vibration Frequencies of a Stiff Piano String" *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 36, no. 1, pp. 203–209, 1964.

- [4] F.Rigaud, B.David, L.Daudet, "A parametric model and estimation techniques for the inharmonicity and tuning of the piano", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 133, no. 5, pp. 3107–3118, 2013.
- [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] Klapuri, A. (2003). "Multiple fundamental frequency estimation based on harmonicity and spectral smoothness," *IEEE Trans. Speech Audio Process*. 11(6), 184–194
- [7] Jukka Rauhala, Heidi-Maria Lehtonen, Vesa Välimäki, Fast automatic inharmonicity estimation algorithm (2007), *The Journal of the Acoustical Society of America* 121, EL184, DOI: 10.1121/1.2719043
- [8] H. Fletcher, E. D. Blackham, and R. Stratton, "Quality of piano tones," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 34, no. 6, pp. 749–761, 1962.
- [9] F.Scalcon, D.Rocchesso, G.Borin, "Subjective evaluation of the inharmonicity of synthetic piano tones", *Zbornik radova International Computer Music Conference ICMC '98*, pp 53-56, 1998.
- [10] H. Järveläinen, V. Välimäki, M.Karjalainen, "Audibility of inharmonicity in string instrument sounds, and implications to digital sound synthesis", *Zbornik radova International Computer Music Conference*, pp. 359-362, Beijing, China, 1999.
- [11] 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.
- [12] T. Miljković, J. Damnjanović, J. Čertić, D. Šumarac Pavlović, "Uticaj estimacije frekvencija harmonika na procenu koeficijenta inharmoničnosti čembala", *Zbornik radova 65. Konferencije ETRAN*, pp. 9 -14, Etno selo Stanišići, Sep, 2021.
- [13] T. Miljković, M. Bjelić, D. Šumarac Pavlović, J. Čertić, "Koeficijent inharmoničnosti tonova harfe – Specifičnost i problemi automatske procene", *Zbornik radova 66. Konferencije ETRAN*, pp. 1 - 6, Društvo za Etran, Novi Pazar, Jun, 2022.
- [14] J. Čertić, D. Šumarac Pavlović, I. Salom, "Softverski paket za obradu i analizu audio signala", *TELFOR 2010*, pp. 1269-1272, Beograd, Nov., 2010.
- [15] Tehnička dokumentacija proizvođača, dostupno na mreži: http://download.steinberg.net/downloads_hardware/UR22/UR22_documentation/UR22_OperationManual_en.pdf, pristupano 27.4.2023. Tehnička dokumentacija proizvođača, dostupno na mreži: https://www.akg.com/on/demandware.static/-/Sites-masterCatalog_Harman/default/dwca0895af/pdfs/AKG_K92_Cutsheet.pdf, pristupano 27.4.2023

ABSTRACT

In this paper, different ways of harp tones synthesis are analyzed. Based on subjective tests, the naturalness of the synthesized tones was evaluated. Tones are synthesized on the basis of parameters estimated from realistically recorded tones of different pitch and pronounced inharmonicity. The paper proposes a synthesis method that should enable independent adjustment of various signal parameters, including temporal and spectral envelopes and the inharmonicity coefficient. Based on the results of the subjective tests, a synthesis method was chosen that will be used in further research on the inharmonicity influence on the perception of the tones of musical instruments.

Subjective evaluation of different synthesis methods of musical tones with pronounced inharmonicity

Tatjana Miljković, Jelena Čertić, Dragana Šumarac Pavlović