

# Uporedna analiza procene snage metodama estimacije spektralne gustine snage kardiovaskularnih signala u oceni simpatovagalnog balansa hipertenzivnih pacijenata

Jovana Arsenović, Sara Dobošarević, Tamara Škorić

Departman za energetiku, elektroniku i telekomunikacije  
Fakultet tehničkih nauka

Novi Sad, Srbija

[arsenovic.jovana@gmail.com](mailto:arsenovic.jovana@gmail.com), [saradobosarevic@gmail.com](mailto:saradobosarevic@gmail.com),  
[tamara.ceranic@gmail.com](mailto:tamara.ceranic@gmail.com)

Branislav Milovanović

Departman za kardiologiju, neurokardiološka laboratorija  
Bolnica „Bežanijska Kosa”

Beograd, Srbija

[branislav\\_milovanovic@vektor.net](mailto:branislav_milovanovic@vektor.net)

**Sažetak**— Procena snage signala srčanog ritma (*Heart Rate-HR*) zastupljena je u medicinskoj dijagnostici u cilju analize aktivnosti autonomnog nervnog sistema u radu srca. Nedostatak standarda doveo je do toga da se za procenu snage koriste različite metode: od klasičnih neparametarskih (periodogram, *Welch*), parametarskih (Burg metod), sve do novih metoda namenjenih isključivo za HR signale. U radu je komparativno prikazana procena srednje snage HR signala hipertenzivnih pacijenata pre i nakon upotrebe Karvileks® leka uobičajenim metodama za procenu spektralne gustine snage. Pokazano je da prisustvo artefakata u HR signalu značajno utiče na promene u proceni srednje snage što ukazuje na neophodnost odgovarajuće predobrade (automatsko ili manuelno uklanjanje artefakata) signala. Upotreba Karvileks® leka nije doprinela promenama u simpatovagalnom balansu.

**Ključne reči**— procena spektralne gustina snage; artefakti; periodogram; *Welch*; Burg; RR interval; (key words)

## I. UVOD

Prema podacima Svetske zdravstvene organizacij (WHO), među vodećima uzročnicima smrtnosti u svetu su kardiovaskularna oboljenja [1], među kojima je hipertenzija zastupljena sa bar 45% [2]. Sino-atrijalna kontrola srčanog ritma se vodi simpatetičkim i parasimpatetičkim refleksnim putevima autonomnog nervnog sistema. Spektralna analiza signala srčanog ritma (*Heart Rate-HR*) omogućava uvid u pojavu karakterističnih periodičnost i preraspodelu procenjene snage u karakterističnim frekvencijskim opsezima pomoću kojih se procenjuju simpatovagalni balans [3].

Spektralna gustine snage (*power spectral density-psd*) HR signala uobičajeno se procenjuje neparametarskim metodama kao što su periodogram, *Welch* i parametarskim metodama koji pretpostavljaju autoregresivni (AR) model HR signala. Biomedicinski signali neretko oskudnih dužina (usled ograničenih uslova kliničkog snimanja), neekvidistantnog odmeravanja kao posledice prirodnih karakteristika signala a i zbog prisustva artefakata u signalu zahtevaju dodatnu obradu pre

procene spektralne gustine snage. Iako su u literaturi predložene metode za procenu spektra koje ne zahtevaju ekvidistantno odmeravanje kao što je Lomb periodogram [4], u TaskForce® monitoru podržana je procena *psd* uobičajenim AR parametarskim metoda [5].

U eri razvoja komercijalnih pametnih uređaja koji podržavaju merenje HR signala kamerama ili mobilnim ECG uređajima kao i razvoj aplikacija koje korisnicima nude procenu kardiovaskularnih parametara nedostatak zlatnog standard u odabiru metoda kao i njihovih parametara može dovesti do različitih fizioloških interpretacija prikazanih rezultata. Dodatno, procena je da razvijeni pametni uređaji mogu postati deo koncepta *crowdsensing* platformi u zdravlju koji će na osnovu procenjenih kardiovaskularnih parametara dostavljati korisnicima informacije o njihovom zdravstvenom stanju pomoću metoda mašinskog učenja [6].

U radu je uporedno prikazana procena srednje snage HR signala neparametarskim metodama: periodogram i *Welch* metodom kao i Burg parametarskom metodom hipertenzivnih pacijenata pre i nakon upotrebe Karvileks® leka. Takođe je proverena osetljivost procenjene snage na prisustvo artefakata.

## II. EKSPERIMENTALNI PODACI

U radu je analizirana procena srednje vrednosti snage signala srčanog ritma (*Heart Rate-HR*) snimljenih u bolnici „Bežanijska Kosa” u Beogradu, pod nadzorom prof. dr Branislava Milovanovića. U eksperimentu je učestvovalo 30 pacijenata-volontera, različitog pola i starosti ( $45,7 \pm 17,5$  godina). HR signal snimljen je TaskForce® monitorom sa frekvencijom odabiranja od 1000 Hz [7]. Artefakti su uklonjeni filtrom namenjenim za HR vremenske nizove [8], dok je sporo promenljiva komponenta u signalima redukovana pomoću predloženog filtra u [9]. Analizirani su samo signali koji ispunjavaju uslove stacionarnosti u širem smislu, dužine 1400 odmeraka. Svi pacijenti su imali dijagnostikovanu hipertenziju. Praćene je efekat leka Karvileks® na promene u procenjenoj

srednjoj snazi signala u značajnim frekvencijskim opsezima. Eksperiment je rađen u skladu sa etičkim standardima Medicinskog fakulteta, Univerziteta u Beogradu, uz potpisanu pismenu saglasnost svih volontera.

### III. METODE

#### A. Procena spektralne gustine snage (psd) HR signala

Klasične metode procene spektralne gustine snage (*power spectral density*-psd) signala sa neekvidistantnim odmeravanjima zahteva ponovno odmeravanje na uniformnim intervalima. Kako bi se postigla ekvidistantnost u odmeravanju primenjuju se različite tehnike interpolacije, od najjednostavnijih kao što su ponavljanje najbliže vrednosti odmerka, do složenijih kao što su linearana i polinomne interpolacije. Kardiovaskularni vremenski nizovi se beleže od otkucaja do otkucaja srca, pa su po svojoj prirodi neekvidistantni. Na Sl. 1 uporedno su prikazani rezultati interpolacije različitih tehnika na RR signalu ( $RR [ms] = 60000/HR[bpm]$ ) i neekvidistantnih odmeraka (popunjene zelene kružnice).

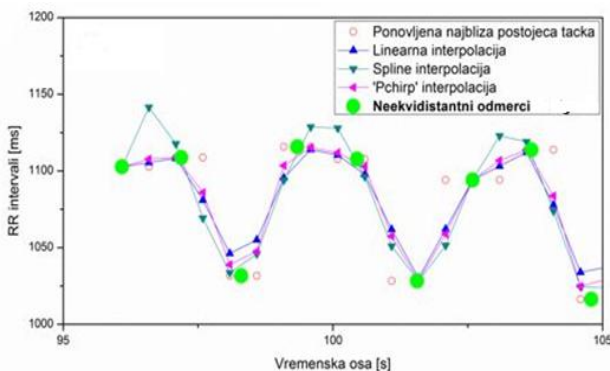
#### B. Neparametarske metode

Periodogram je najjednostavniji način procene spektralne gustine snage na osnovu kvadrirane amplitude DFT signala konačne dužine trajanja  $N$ :

$$\widehat{P}_{per} = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi f n} \right|^2 = \frac{1}{N} |X(f)|^2 \quad (1)$$

$X(n)$  predstavlja Fourijeovu transformaciju vremenskog niza  $x(n)$ . Ova neparametarska procena spektralne gustine snage je jednostavna, ne zahteva procenu autokorelacione funkcije, ali je i nekonzistentna [10]. Dodatno, izbor pravouganog prozora može dovesti do pojave „curenja spektra”. Periodogram se smatra dovoljno dobrim izborom ukoliko su nam na raspolaganju vremenski nizovi velikih dužina.

*Welch* metoda predstavlja atraktivnu modifikaciju klasičnog periodograma koja ima za cilj da unapredi konzistentost i redukuje pojavu „curenja spektra”. *Welch* metodom usrednjava se više procena periodogramom urađene na delovima signala izdvojenim nepraouganim prozorskim funkcijama (uobičajne su funkcije *Hamming* ili *Hanning*). Dozvoljeno preklapanje prozorskih funkcija ublažava gubitak na rubnim delovima usled odabira prozorskih funkcija. Segmentacija signala i izbor nepravouganih prozorskih funkcija doprinosi smanjenju varijanse procenjenog spektra i „curenja spektra” dok istovremeno frekvencijska rezolucija nije značano narušena [10].



Slika 1. Uporedni prikaz odstupanja interpoliranih vrednosti od originalnih vrednosti odmeraka RR intervala [13].

Procena *psd Welch* metodom vrši se u skladu sa formulom [12]:

$$\widehat{P}_{Welch} = \frac{1}{KL} \sum_{i=0}^{K-1} \left| \sum_{n=0}^{L-1} w(n) x(n + iD) e^{-j2\pi f n} \right|^2 \quad (2)$$

gde je  $w$ -prozorska funkcija,  $L$ -dužina segmenta,  $K$ -broj segmentata a  $D$ -početna tačka za drugi segment (ako je  $D=L$  nema preklapanja segmenata).

#### C. Parametarske metode

Parametarske metode procene *psd* podrazumevaju predznanje o signalu, tj. poznavanje modela koji oponaša analizirani signal. Koristi se autoregresivni prediktivni model, pa se parametarske metode neretko nazivaju autoregresivnim metodama. Ukoliko model verodostojno oponaša signal, performanse parametarskih metoda kao što su frekvencijska rezolucija i „curenja spektra” mogu biti unapređenje u poređenju sa klasičnim neparametarskim metodama [13]. U radu je za procenu *psd* korišćena *Burg*-ova metoda kao uobičajena parametarska metoda koja se koristi u proceni spektra HR signala [14],[15].

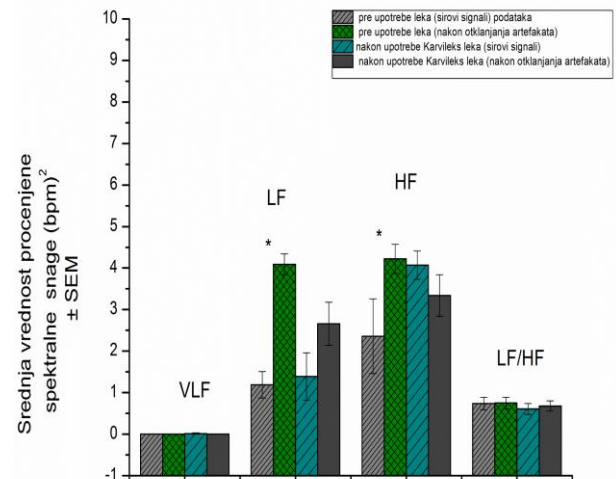
*Burg*-ova metoda je zasnovana na minimizaciji greške predviđanja unapred i unazad (*forward-backward*), dok ispunjava Levinson–Durbin rekuzivnost [13]:

$$\widehat{P}_{Burg} = \frac{\widehat{\epsilon}_p}{|1 + \sum_{k=1}^p \widehat{a}_p(k) e^{-j2\pi f k}|^2} \quad (3)$$

gde je  $\widehat{a}_p(k)$  autoregresivni parametar, a  $\widehat{\epsilon}_p$  ukupna minimalna kvadratna greška. Izbor parametra  $p$  je vrlo značajan za ovu metodu, uobičajen izbor za HR signal je  $p=16$  [15],[16].

### IV. REZULTATI I DISKUSIJA

Analizirali smo osetljivost procene srednje snage HR signala na prisustvo artefakata u karakterističnim frekvencijskim opsezima VLF (0,003-0,04) Hz, LF (0,04-0,15) Hz i HF (0,15-0,4) Hz kod ljudi. VLF predstavlja HR sa periodama između 25s i 300s, LF i HF odgovara HR sa kraćim periodama koje su pogodene efektom disanja [17]. HF opseg ukazuje na vagalnu aktivnost dok procena LF/HF odgovara simpato-vagalnom balansu [18].

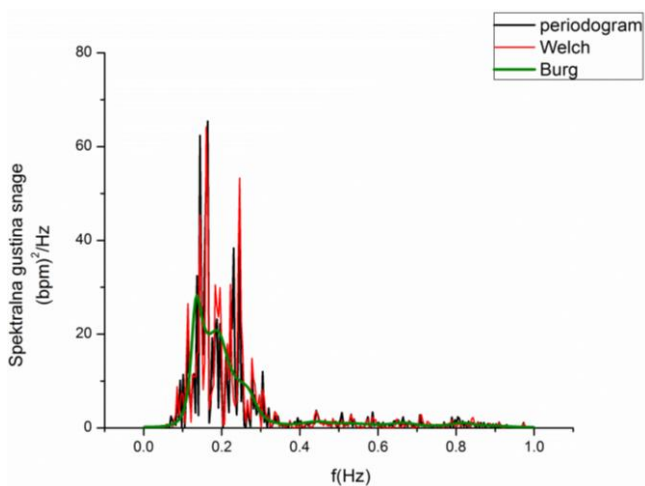


Slika 2. Procena spektralne snage u karakterističnim opsezima VLF, LF i HF pre i nakon upotrebe Karvileks@ leka.

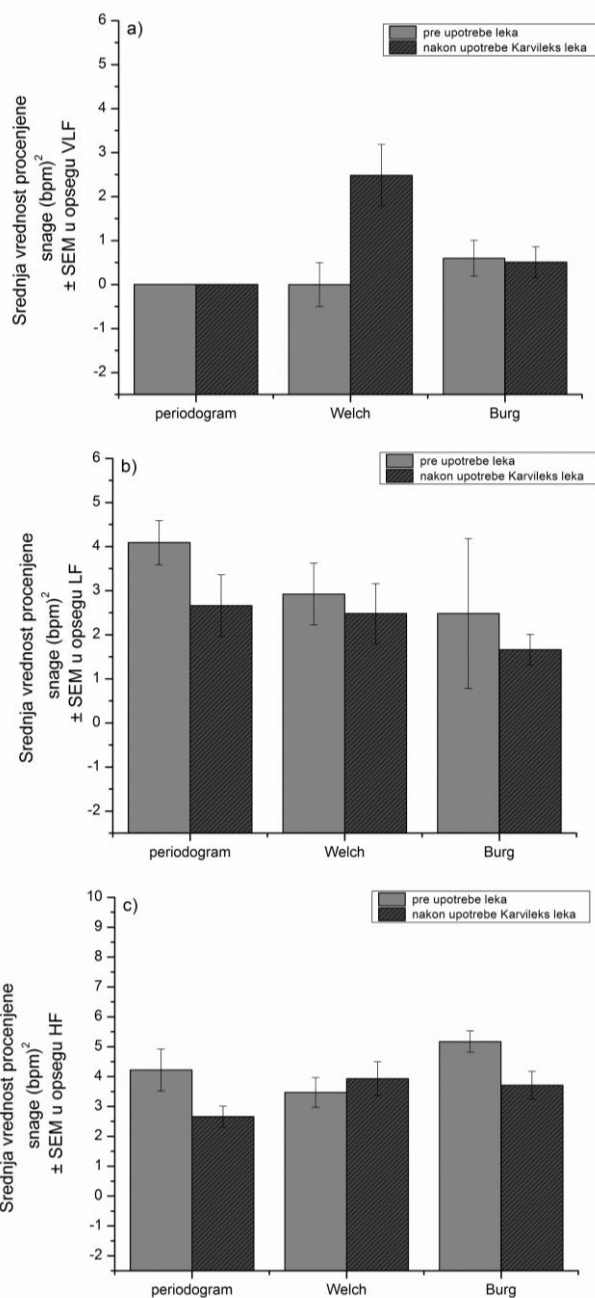
Opseg ULF za frekvencije ( $\leq 0.003$  Hz) nije analiziran zbog kratkotrajnih kliničkih snimljenih HR signala. Na Sl. 2 prikazana je srednja vrednost  $\pm$  SEM procenjenih snaga u karakterističnim opsezima na originalnim signalima i signalima sa artefaktima. Uočavaju se značajna statistička odstupanja u procenjenim snagama HR signala u LF, HF opsezima. Efekti prisustva artefakta na odnos snaga u LF/HF, tj. simpatovagalnom balansu, nisu uočeni. Dodatno, ne postoje statistički značajne promene u procenjenoj snazi signala u karakterističnim opsezima nakon upotrebe Karvileks® leka.

Na Sl. 3 uporedno je prikazana procena spektralne gustine snage HR signala nakon otklanjanja artefakata, pre upotrebe Karvileks® leka. Klasične neparametarske metode periodogram i Welch metoda (označene crvenom i crnom bojom, respektivno) pokazale su podudarnosti, za razliku od procene dobijene parametarskom Burg-ovom metodom (označena zelenom bojom).

Procena srednje vrednosti spektralne gustine snage periodograma, Welch i Burg metodom za karakteristične frekvencijske opsege VLF, LH i HF prikazan je na Sl. 4 a), b) i c) respektivno. Statistička značajnost u promeni procenjene spektralne snage HR signala hipertenzivnih pacijenata pre i nakon upotrebe Karvileks® leka nije uočena bezobzira na odabranu metodu za procenu snage.



Slika 3. Uporedni prikaz procene periodogramom, Welch i Burg metodom



Slika 4. Procena snage neparametarskim metodama: periodogram i Welch i parametarskom Burg metodom.

## V. ZAKLJUČAK

U radu je analizirana promena u proceni srednje vrednosti snage originalnih i obrađenih (uklonjeni artefakti) HR signala metodama periodogram, *Burg* i *Welch* u značajnim frekvencijskim opsezima za dijagnostiku stanja pacijenata. Uočene su statistički značajne promene u proceni snage HR signala usled prisustva artefakata, što ukazuje na potrebu za korišćenja filtra za automatsko ublažavanje prisustva artefakata u HR signalu pri razvijanju aplikacija za procenu kardiovaskularnih parametara na komercijalnim pametnim uređajima. Odabir različitih metoda za procenu srednje snage nije doveo do različitih fizioloških interpretacija dobijenih rezultata. Promene u procenjenim snagama nakon upotrebe Karvileks® leka kod hipertenzivnih pacijenata nisu uočene.

## ZAHVALNICA

The presentation of this work was supported by the Serbian Ministry of Education, Science and Technology Development, under Grant TR32040. The work is sheltered by the EU COST-Action CA15104 "Inclusive Radio Communication Networks for 5G and beyond"- SEWG-IoT: Internet-of-Things for Health.

## LITERATURA

- [1] [https://www.who.int/cardiovascular\\_diseases/en/](https://www.who.int/cardiovascular_diseases/en/)
- [2] [http://ish-world.com/downloads/pdf/global\\_brief\\_hypertension.pdf](http://ish-world.com/downloads/pdf/global_brief_hypertension.pdf) (A global brief on Hypertension, World Health Day 2013)
- [3] S. Akselrod, D. Gordon, F. A. Ubel, D. C. Shannon, A. C. Berger, R. J. Cohen, "Power spectrum analysis of heart rate fluctuation: a quantitative probe of beat-to-beat cardiovascular control," *Science*, vol. 10, pp. 220-222, 1981.
- [4] J. Fortin, G. Haïtchi, A. Bojic, W. Habenbacher R. Grullenberger, A. Heller, R. Pacher and et al., "Validation and verification of the Task Force® monitor," *Results of Clinical Studies for F DA 510(k)*, pp. 1-7, 2001.
- [5] J. Fortin, G. Haïtchi, A. Bojic, W. Habenbacher R. Grullenberger, A. Heller, R. Pacher and et al., "Validation and verification of the Task Force® monitor," *Results of Clinical Studies for F DA 510(k)*, pp. 1-7, 2001.
- [6] S. Jovanovic, M. Jovanovic, T. Škoric, S. Jokic, B. Milovanovic, K. Katzis and D. Bajic, "A Mobile Crowd Sensing Application for Hypertensive Patients," *Sensors*, pp. 1-16, 2019.
- [7] <https://www.cnsystems.com/products/task-force-monitor>
- [8] N. Wessel, H. Malberg, R. Bauernshmitt, J Kuths, "Nonlinear methods of cardiovascular physics and their clinical applicability," *International Journal of Bifurcation and Chaos*, vol. 17, pp. 3325-3371, 2007.
- [9] M.P. Tarvainen, P.O. Ranta-aho, and P.A. Karjalainen, "An advanced detrending approach with application to HRV analysis," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 42, pp. 172-174, 2002.

- [10] S. Zhiqiang, C. Hongchu, C. Yanping, "Application of periodogram and Welch based spectral estimation to vortex frequency extraction," *ISDA*, pp. 1383-1386, 2012.
- [11] P.D. Welch, "The use of fast fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms," *IEEE Trans Audio Electroacoustics*, vol. 15, pp. 70-73, 1967.
- [12] T. Skoric and D. Bajic, "Praktikum iz obrade biomedicinskih signala", neobjavljeno.
- [13] O. Faust, R.U. Acharya, A. R. Allen, C. M. Lin, "Analysis of EEG signals during epileptic and alcoholic states using AR modeling techniques," *IRBM*, vol. 29, pp. 44-52, 2008.
- [14] M. N. Ansourian, J. H. Dripps, G. J. Beattie, and K. Boddy, "Autoregressive spectral estimation of fetal breathing movement," *IEEE Trans Biomed Eng.*, vol. 36, pp. 1076-1084, 1989.
- [15] O. H. Colak, "Preprocessing effects in time-frequency distributions and spectral analysis of heart rate variability," *Digital Signal Processing*, vol. 19, pp. 731-739, 2009.
- [16] R. Bartels, L. Neumamm, T. Peçanha, A. Roncally, and S. Carvalho, "SinusCor: an advanced tool for heart rate variability analysis," *Biomed Eng Online*, vol. 16, pp. 110-, 2017.
- [17] F. Shaffer and J. P. Ginsberg, "An overview of heart rate variability metrics and norms," *Front Public Health*, vol. 5, pp. 1-17, 2017.
- [18] S. Akselrod, and D. Gorodon, "Power spectrum analysis of heart rate fluctuation: a quantitative probe of beat-to-beat cardiovascular control," *Science*, vol. 213, pp. 220-222, 1981.

## ABSTRACT

Power spectral density estimation (*psd*) of the heart rate signal (HR) indicates the activity of the autonomic nervous system. The lack of standard contributed to the selection of various methods for *psd* estimation such as classical nonparametric (periodogram, *Welch*), parametric (*Burg* method) and the proposed new methods designed especially for *psd* of HR signals. The paper presents a comparative analysis of the various methods for *psd* estimation in hypertensive patients before and after the use of Karvileks® medication. It has been shown that the artifacts in the HR time series influence *psd* estimation, indicating that it is necessary to pre-process HR time series prior the application of the methods. The effects of Karvileks® medication did not cause changes in the sympathovagal balance.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR ESTIMATING THE SPECTRAL DENSITY OF CARDIOVASCULAR TIME SERIES IN THE ASSESSMENT OF THE SYMPATHOVAGAL BALANCE

Jovana Arsenović, Sara Dobošarević, Branislav Milovanović,  
Tamara Škoric