

Ritmovi srca: Znaci složenosti i poremećaja u elektrokardiografskim signalima

Jelena Kršić

Laboratorija za Atomsku fiziku
Institut za nuklearne nauke "Vinča"
Institut od nacionalnog značaja za
Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija
jkrasic@vin.bg.ac.rs
0000-0002-4851-4401

Aleksandra Maluckov

Laboratorija za Atomsku fiziku
Institut za nuklearne nauke "Vinča"
Institut od nacionalnog značaja za
Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija
sandram@vin.bg.ac.rs
0000-0002-6474-360X

Danka Stojanović

Laboratorija za Atomsku fiziku
Institut za nuklearne nauke "Vinča"
Institut od nacionalnog značaja za
Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija
dankas@vin.bg.ac.rs
0000-0002-7178-1970

Vladimir Atanasoski

Laboratorija za Atomsku fiziku
Institut za nuklearne nauke "Vinča"
Institut od nacionalnog značaja za
Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija
vladimir.atanasoski@vin.bg.ac.rs
0000-0003-1695-6341

Marija D. Ivanović

Laboratorija za Atomsku fiziku
Institut za nuklearne nauke "Vinča"
Institut od nacionalnog značaja za
Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija
marijap@vin.bg.ac.rs
0000-0002-7218-6575

Jovana Petrović

Laboratorija za Atomsku fiziku
Institut za nuklearne nauke "Vinča"
Institut od nacionalnog značaja za
Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija
jovanap@vin.bg.ac.rs
0000-0002-1002 241X

Abstract— U ovom radu istražujemo različite srčane ritmove primenom formalizma i teorije kompleksnih sistema na EKG signale. Rezultati pokazuju da se metrike zasnovane na RR intervalima, varijabilnost srčanog ritma i Šenonova entropija, mogu koristiti za razlikovanje periodičnih od neperiodičnih ritmova, dok se periodični ritmovi dodatno klasifikuju po frekvenciji srčanih otkucaja. Veličine koje u obzir uzimaju i amplitude signala, kao što su parametri Poenkareovih dijagrama i multifraktalnih spektara, daju nove informacije i indikatore kompleksnosti EKG signala, te predstavljaju potencijalne nove biomarkere aritmija. Prikazani rezultati predstavljaju korak ka sistematičnom povezivanju dinamičkih parametara EKG signala sa biomarkerima korisnim u kliničkoj praksi.

Ključne reči — srčani ritam, Šenonova entropija, Poenkareov presek, multifraktalnost, atrijalni flater, atrijalna fibrilacija

I. UVOD

Kompleksnost leži u osnovi prirodnih procesa, manifestujući se kroz mnoštvo fenomena od složenih obrazaca dinamike galaksija do dinamike neuralnih sinapsi i fizioloških procesa u živim organizmima. Ona se može opisati nelinearnim interakcijama i dinamikom sistema na različitim vremenskim i prostornim skalama.

U ovom radu fokus je na srcu, mišićnom organu koji, aktiviran električnim impulsima, omogućava cirkulaciju krvi obogaćene kiseonikom kroz pluća i ostale organe, čime obezbeđuje funkcionalnost organizma. Informacije o aktivnosti srca ključne su za prevenciju brojnih fatalnih zdravstvenih stanja, ali i za bolje razumevanje kompleksnosti fizioloških procesa.

Inicijalizacija srčanog ritma odvija se u sinoatrijalnom (SA) čvoru, prirodnom pejsmejkeru u desnoj pretkomori (atrijum), odakle se električni impuls prenosi preko sprovodnog sistema (atrioventrikularnog (AV) čvora i Hisovog snopa) do srčanog mišića miokarda, obezbeđujući

koordinisanu kontrakciju srca [1]. Električna aktivnost srca manifestuje se kroz ciklus koji obuhvata depolarizaciju i repolarizaciju pretkomora i komora, a širi se do površine tela omogućavajući snimanje EKG-a signala.

Zbog složenosti mehanizama koji upravljaju srčanom aktivnošću, EKG zapis karakterišu nelinearne, neregularne i često haotične karakteristike. Poremećaji ritma mogu nastati usled blokade impulsa unutar sprovodnog sistema ili usled dodatnih električnih okidača u pretkomorima, što dovodi do aritmija kao što su atrijalni flater (Afl) i atrijalna fibrilacija (Afib). Ekstremna stanja, poput ventrikularne fibrilacije, predstavljaju životno ugrožavajuće poremećaje. Takođe, disfunkcija SA čvora može uzrokovati usporeno (sinusna bradikardija - SB) ili ubrzano (sinusna tahikardija - ST) generisanje srčanih impulsa. Ukoliko do ubrzanja ritma dođe zbog prevremenih okidanja u pretkomorima ili komorama nastaju atrijalna (AT) ili ventrikularna (VT) tahikardija.

U kliničkoj praksi, analiza srčanog ritma zasniva se na vremenskim intervalima između impulsa i morfologiji EKG signala. Lekari se pritom oslanjaju na biomarkere poput RR intervala, varijabilnosti srčanog ritma (HRV), širine QRS kompleksa i prisustva P i T talasa. Sa druge strane, savremene metode analize kompleksnosti EKG signala uključuju procenu heterogenosti i nelinearnosti signala primenom fraktalne i multifraktalne analize [3]-[7], entropijskih mera [8], [9] i metoda nelinearne dinamike [10]. U tu svrhu koriste se parametri poput Šenonove entropije, fraktalne dimenzije i Poincareovih preseka. Sa razvojem mobilnih EKG tehnologija koje generišu velike baze podataka pogodne za statističku analizu ovaj pristup sve više dobija na značaju.

Iako je veza između kliničkih biomarkera i mera kompleksnosti delimično uspostavljena, pre svega kroz analize HRV-a, ove metode ostaju uglavnom ograničene na vremenske karakteristike serije srčanih impulsa. Povezanost amplitudnih i faznih komponenti, kao i morfoloških i dinamičkih obrazaca EKG signala sa osnovnim fiziološkim procesima i klinički značajnim parametrima i dalje nije u potpunosti razjašnjena,

Istraživanje je sprovedeno uz podršku Fonda za Nauku Republike Srbije, 7754338 Multi-Sensor System and Artificial Intelligence in Service of Heart Failure Diagnostics – SensSmart i Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija, 451-03-136/2025-03/200017.

kako u kliničkoj tako i u inženjerskoj zajednici [11]. Dosadašnji pomaci u ovom pravcu pretežno se zasnivaju na metodama veštačke inteligencije, koje, iako uspešne u detekciji obrazaca, često ne omogućavaju interpretaciju uzročnih mehanizama uočenih korelacija [12].

Studija čije preliminarne rezultate prikazujemo u ovom radu ima za cilj da utvrdi vezu između mera kompleksnosti različitih srčanih ritmova i njihovih kliničkih biomarkera. Konkretno, proučavamo amplitudne i fazne karakteristike signala i izdvajamo pouzdane pokazatelje normalnog ritma, bradikardije, tahikardije, Afl i Afib. Pritom pružamo i nove uvide u procese u osnovi aritmija i njihovih opservabli u EKG merenjima.

II. MODEL I METODE

A. Predprocesiranje signala

Tipični EKG se sastoji od P talasa (talas pretkomorske depolarizacije), QRS kompleksa (talasi komorske depolarizacije) i T talasa (talas komorske repolarizacije). Tačno i robusno obrađivanje karakteristika signala, posebno određivanje R tačaka u EKG talasu, od presudne je važnosti za karakterizaciju srčanog ritma. Međutim, pored korisnog signala, EKG snimci sadrže šumove koji često prikrivaju tačke od interesa, te se pre analize signala moraju ukloniti. Prema spektralnom sadržaju šumove možemo podeliti na spori šum bazne linije koji proizilazi iz sporog kretanja, disanja ili driftova u instrumentaciji, elektromiografski šum, šum od interferencije sa električnom mrežom na 50 Hz ili 60 Hz i artefakte. U ovom radu, niskofrekventne i visokofrekventne šumove smo eliminisali primenom 0,5 - 40 Hz Butterworth-ovog band-pass filtra četvrtog reda, a komponentu interferencije sa električnom mrežom pomoću 50 Hz notch filtera. Filteri su primenjeni u oba smera kako bi se sačuvala faza signala. Elektromiografski šum uklonjen je iterativnim regenerativnim metodom koji očuvava morfologiju signala [13]. Po ukljanjanju šuma, R tačke smo našli Pan-Tompkins metodom [14].

B. Karakteristike EKG signala

Karakteristike signala izdvajamo iz ansambla RR intervala i amplituda EKG signala u odvodu I koristeći pristupe statističke analize i nelinearne dinamike.

1) Karakteristike zasnovane na RR intervalima, kao što su srednja vrednost, varijansa i srčani ritam (HR), odražavaju električnu aktivnost komora. Srčani ritam izračunat je na osnovu prosečne RR vrednosti:

$$HR[s] = \frac{60}{\langle RR \rangle} . \quad (1)$$

2) Merenja entropije u biomedicinskoj obradi signala zasnovana su na teoriji verovatnoće i nelinearnoj dinamici. Ovde računamo Šenonovu entropiju ($S_{RR(EKG)}$), meru informacionog sadržaja u signalu, koja ukazuje na stopu neregularnosti signala i omogućava procenu predvidljivosti signala. Izračunavamo je za skup RR intervala i distribuciju amplituda EKG signala koristeći izraz:

$$S_{RR(EKG)} = \sum_{i=1}^{nbin} f(i) \ln(f(i)) , \quad (2)$$

gde je $f(i)$ histogram RR intervala ili amplituda signala, a $nbin$ broj histogramskih binova.

3) Poenkareov dijagram je jednostavna nelinearna metoda za izdvajanje i ilustrovanje podataka iz složenih karakteristika signala [15]. On povezuje uzastopne rezultate merenja sa prethodnim tako što prikazuje tačke sa koordinatama ($RR(i)$, $RR(i+1)$), pri čemu indeks i uzima vrednosti od 1 do $N-1$, gde je N broj srčanih otkucaja u signalu. Time je prikazan vremenski razvoj signala. Iz njega se izračunava nekoliko parametara koji ilustruju obrasce unutar skupa podataka. Ovaj koncept primenili smo na skup RR intervala i distribuciju amplituda signala. Dodajemo da je korisna osobina Poenkareovog dijagrama ta da se može primeniti na nefiltrirane i nestacionarne podatke [16].

4) Multifraktalna analiza je primenjena u kardiologiji kako bi otkrila strukturne razlike u obrascima srčanih ritmova i povezala ih sa zdravim i patološkim stanjima. Pokazano je da povećana složenost srčanih ritmova korelira sa aritmičnim i patološkim stanjima, često ukazujući na povišene rizike od nepovoljnih kardiovaskularnih događaja [4], [5]. Multifraktalna struktura signala ilustruje se spektrom singulariteta $D(h)$, koji opisuje raspodelu lokalnih skalirajućih eksponenata, tzv. Hölderovih eksponenata – h , i povezuje ih sa odgovarajućom fraktalnom dimenzijom. Matematički, spektar singulariteta može se dobiti iz relacije

$$D(h) = \tau(q) - qh , \quad (3)$$

gde je $\tau(q)$ funkcija skaliranja koja se određuje iz participacione funkcije $Z_q(\epsilon)$ definisane nad izabranom merom, u ovom slučaju raspodelom amplituda signala. Hölderov eksponent se dobija kao prvi izvod skalirajuće funkcije:

$$h(q) = d\tau(q)/dq . \quad (4)$$

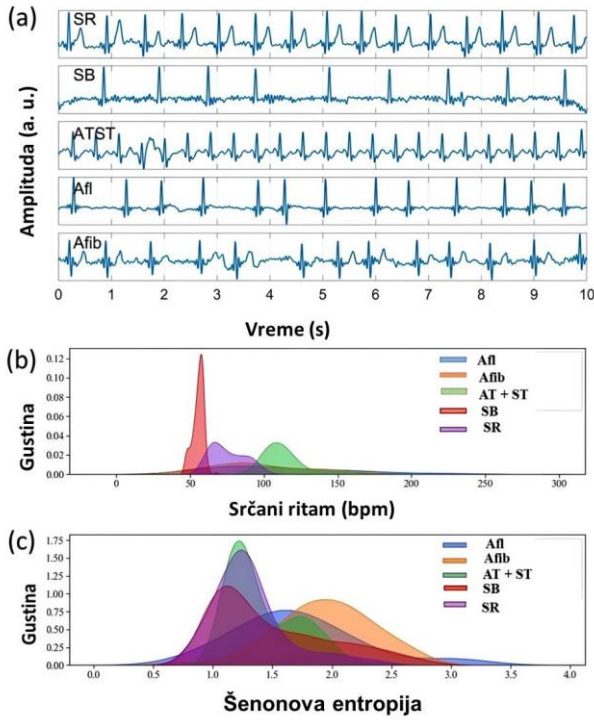
Karakteristike spektra singulariteta uključuju poziciju i visinu maksimuma, širinu spektra, stepen asimetrije, kao i druge parametre koji kvantifikuju stepen multifraktalnosti i složenosti signala.

C. Baze podataka korišćene u istraživanju

Trajanje signala je ključni faktor u analizi složenih signala. U ovom istraživanju, koristili smo signale različitih trajanja: 10-sekundne EKG signale iz javne baze koju je objavio Chapman University i Ningbo First Hospital of Zhejiang University [17] i 30-sekundne EKG signale iz privatne baze podataka.

Iz prve baze odabrali smo podskup od 334 snimka koji prema anotaciji datoj uz bazu sadrže signale pacijenata sa sinusnim ritmom (SR) – 40 signala, Afib – 49 signala, tahikardijom (sinusnom (ST) i atrijskom (AT)) – 74 signala, sinusnom bradikardijom (SB) – 156 signala i Afl – 15 signala, dok ne sadrže ventrikularne ekstrasistole (VES). VES bitove smo eliminisali zato što se oni javljaju povremeno i vezani su za pojedinačne srčane otkucaje, a remete srčani ritam toliko da se mogu pogrešno detektovati kao Afib. Anotaciju VES-a su sproveli kardiolozi elektrofiziolozi i javno je dostupna u [18].

Privatna baza podataka sadrži 116 30-sekundnih signala, pročitanih i anotiranih od strane kardiologa kao signali sa SR (75 signala), Afib (32 signala) i Afl (9 signala). Ona je snimljena kao deo interne studije. Studija je imala za cilj paralelno sakupljanje signala sa 12-kanalnog standardnog



Sl. 1 a) Primeri srčanih ritmova iz CUZU baze podataka. b) Distribucija HR za različite srčane ritmove. c) Distribucija entropije za različite srčane ritmove dobijena iz RR intervala.

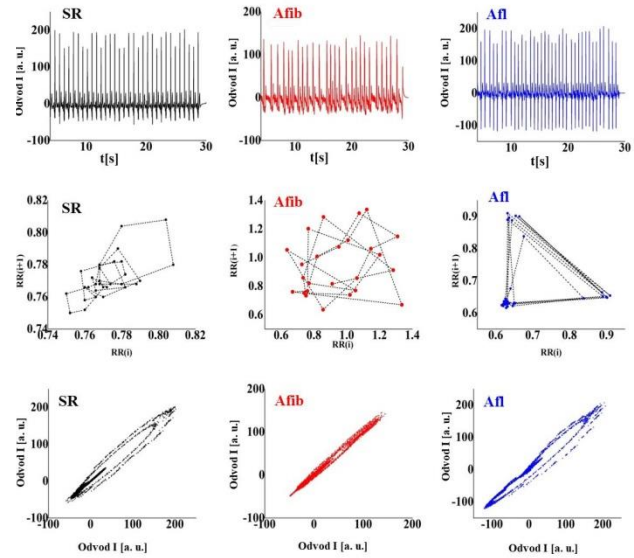
EKG-a i prototipa 3-kanalnog mobilnog EKG uređaja radi kalibracije metode rekonstrukcije 12-kanalnog iz 3-kanalnog EKG-a. Dužina snimanja od 30 s je ciljano veća, u odnosu na standardnu u kliničkim uslovima (8s), s idejom da se u slučajevima nepredviđenih distorzija signala u trajanju od nekoliko sekundi, npr. usled pokreta ili lošeg kontakta sa suvim elektrodama pri snimanju mobilnim uređajem, može iskoristiti deo signala bez distorzije. Signali sa 12-kanalnog EKG-a su obeleženi od strane kardiologa, što smo u radu koristili kao zlatni standard u prepoznavanju aritmija. U radu smo se ograničili na korišćenje signala sa standardnog EKG-a, dok signale dobijene mobilnim uređajem nismo koristili.

Analizi signala predstavljenoj u narednom poglavlju prethodila je uporedna analiza statističkih biomarkera kraćih i dužih signala. Kako 10-sekundni signali sadrže 12-13 srčanih otkucaja, broj tačaka bio je nedovoljan za pouzdano određivanje statističkih markera zasnovanih na RR intervalima. Na kratkim signalima se teško uočavaju i intermitentne promene ritma, prelazak iz regularne u kvaziperiodičnu, haotičnu fazu i obrnuto. Situacija je znatno povoljnija kod 30-sekundnih signala. Signali sa holtera u trajanju od 24 h dali bi još preciznije rezultate i korisne statističke biomarkere kao što je HRV. Međutim, kako je cilj rada povezivanje dinamičkih karakteristika signala sa kliničkom praksom, zadržali smo se na signalima koji se mogu rutinski ambulantno meriti.

III. REZULTATI I DISKUSIJA

A. Regularnost RR intervala

Na Sl. 1(a) prikazani su primeri različitih srčanih ritmova iz

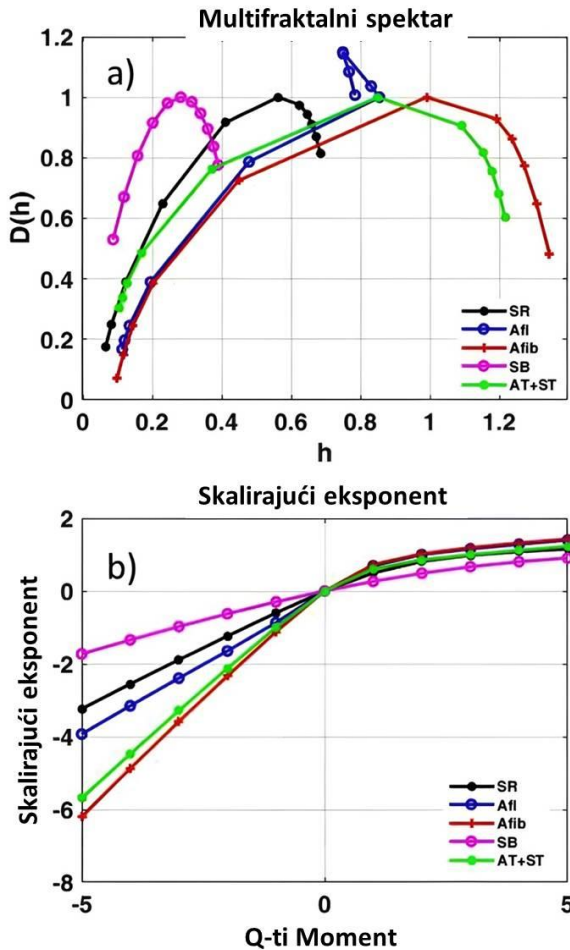


Sl. 2 Privatna baza podataka - 30s EKG signali: primeri snimaka EKG-a odvod I za sinusni ritam, atrijalnu fibrilaciju i atrijalni flater, odgovarajući Poenckareovi dijagrami izračunati za RR intervale i Poincaré dijagrami za amplitude (gore-dole).

CUZU baze podataka. Dok se atrijalna i sinusna tahikardija (AT + ST) i bradikardija (SB) jasno razlikuju od sinusnog ritma (SR) po dužini RR intervala, a Afl i Afib po izraženoj neregularnosti RR intervala, ostaje pitanje kako se ove karakteristike reflektuju na distribucije izračunate na većoj populaciji.

Distribucije po HR i Šenonovoj entropiji prikazane na Sl. 1(b) i 1(c) izračunate su za signale iz CUZU baze. Distribucija HR za SR signale grupisana je oko 75 otkucaja u minutu (bpm), sa odstupanjem od oko 20 bpm. SB i AT+ST ritmovi se jasno izdvajaju sa vrednostima od 55 ± 10 bpm i 115 ± 15 bpm, respektivno. Preklapanje HR distribucija između SR i SB, kao i između SR i AT+ST, minimalno je, što potvrđuje kliničku preporuku da se HR koristi kao pouzdan marker ovih aritmija [19]. Za razliku od HR, Šenonova entropija ne pokazuje jasnu diferencijaciju između SR, SB i AT+ST ritmova budući da su vrhovi njihovih distribucija grupisani oko vrednosti entropije 1.2, što ukazuje na sličan stepen regularnosti. Entropija se stoga ne preporučuje za razlikovanje sporih i brzih regularnih ritmova.

Kod Afl i Afib ritmova situacija je suprotna. Njihove HR distribucije su široke, bez izraženog grupisanja oko srednjih vrednosti, što odražava veliku varijabilnost RR intervala. Afib karakteriše posebno velika standardna devijacija HR od oko 50 bpm, što ukazuje na visoku HRV [19]. Šenonova entropija u ovim slučajevima dobro prati stepen neregularnosti ritma - Afib ima oko 1.8 puta veću entropiju u odnosu na SR, dok je entropija Afl između vrednosti za Afib i regularne ritmove.



Sl. 3 Multifraktalni spektar i krive zavisnosti eksponenata skaliranja od momenta za izabrane SR, SB, AT+ST, Afib, Afl EKG signale iz CUZU baze.

Ovo potvrđuje da se, uz HRV, i Šenonova entropija može koristiti kao skalarni marker stepena neregularnosti srčanog ritma.

B. Analiza amplitude i faze EKG signala

Za detaljniju analizu složenosti atrijskih ritmova Afl i Afib primenjeni su Poincareovi dijagrami koji uzimaju u obzir ili RR intervale ili amplitudne karakteristike signala. U tu svrhu korišćeni su duži zapisi (30 sekundi) iz privatne baze podataka radi pouzdanije statistike.

Sl. 2 ilustruje primere srčanih ritmova različite složenosti. SR odražava prirodne fluktuacije u srčanom ritmu, dok na ritmove Afl i Afib utiču specifični dinamički uslovi unutar pretkomora. Afl je karakterisan kvaziperiodičnim EKG signalima i obrascima tzv. "periodičnog zaključavanja", što se ogleda u ukrštenim strukturama na RR dijagramima i pojavi zatvorenih petlji u dijagramima amplituda. Ove osobine ukazuju na prisustvo reentrantskih krugova ili abnormalnih puteva provodljivosti kao mogućeg mehanizma nastanka Afl. Nasuprot tome, Afib pokazuje znatno veću neregularnost i u vremenskim intervalima i u amplitudama, što je vidljivo kroz rastrkane i nepravilne obrasce u povratnim dijagramima. Ova pojava odražava prelazak sa organizovane, kvaziperiodične

dinamike (Afl) na haotičnu i multifokalnu električnu aktivnost tipičnu za Afib. Neregularnost Afib signala direktno korelira sa porastom složenosti sistema i ukazuje na povećanu nepredvidivost srčane dinamike u toku progresije aritmije.

C. Multifraktalna analiza

Multifraktalna analiza omogućava dekompoziciju EKG signala prema karakterističnim vremenskim skalama, čime se identifikuju obrasci složenosti i varijabilnosti u srčanoj aktivnosti. Na Sl. 3 prikazani su multifraktalni spektri (Sl. 3a) i eksponenti skaliranja (Sl. 3b) za različite srčane ritmove (SR, SB, AT+ST, Afl, Afib).

Sinusni ritam karakteriše uzak i simetričan multifraktalni spektar uz gotovo linearan profil eksponenata skaliranja, što ukazuje na nisku složenost i visoku regularnost sistema nalik na uređene fizičke strukture [20]. Tahikardija (AT+ST) pokazuje širi spektar sa umerenom asimetrijom, što je posledica ubrzanog ali stabilnog ritma i srednjeg nivoa varijabilnosti karakterističnog za sisteme pod spoljnim naprežanjem [21]. Sinusna bradikardija (SB), uprkos usporenom ritmu, zadržava uzak spektar sa blagom asimetrijom, što ukazuje na regularnost sa prisutnim manjim devijacijama u vremenskim skalama, tipičnim za sisteme u približno ravnotežnim stanjima [22].

Nasuprot tome, Afl i Afib pokazuju široke i asimetrične multifraktalne spektre uz izraženu nelinearnost eksponenata skaliranja, što ukazuje na visok stepen složenosti i multifraktalne dinamike. Afib ima veoma širok spektar i izraženu neregularnost, što je karakteristično za haotične i turbulentne sisteme u blizini faznih prelaza ili u kritičnim stanjima [20], [22], [23]. Ovi rezultati ukazuju na to da se multifraktalni spektar i eksponenti skaliranja mogu koristiti za kvantitativnu karakterizaciju složenosti i razlikovanje srčanih ritmova u zavisnosti od njihovih dinamičkih osobina.

IV. ZAKLJUČCI

Analiza dinamike RR intervala i distribucije amplituda EKG signala ukazuje na to da se karakteristike zasnovane na RR intervalima mogu iskoristiti za razlikovanje tahikardije i bradikardije od sinusnog ritma, dok u slučaju atrijske fibrilacije i atrijskog flatera ukazuju na prisustvo složenih i neregularnih obrazaca.

Sa kliničkog stanovišta, mere složenosti EKG signala imaju značajan dijagnostički potencijal. Međutim, primena ovih mera je otežana u prisustvu više različitih aritmija, pri kojima složeniji obrasci mogu maskirati jednostavnije i pravilnije komponente signala.

Prelazak iz regularnih u neregularne srčane ritmove karakteriše se porastom entropije i multifraktalnosti, što odražava opšte principe prelaza u fizičkim sistemima od uređenosti ka haotičnom ponašanju. Naši rezultati ukazuju da, pod patološkim uslovima, srčana dinamika može ispoljiti osobine uporedive sa dinamikom fizičkih sistema u blizini kritičnih tačaka.

REFERENCE/LITERATURA

- [1] A. C. Guyton, E. John, "Textbook of Medical Physiology", Elsevier, Inc. 2006.
- [2] P. E. Cundey III, M.D., J. Martin, M.D. Frank, "Cardiac Rehabilitation and Secondary Prevention after a Myocardial Event", Section of Cardiology, Department of Medicine, Medical College of Georgia, Augusta, Georgia, USA, Clin. Cardiol. vol. 18, pp. 547-553, 1995, <https://doi.org/10.1002/clc.4960181003>
- [3] A. L. Goldberger, L. A. Amaral, J. M. Hausdorff, P. C. Ivanov, C. K. Peng, H. E. Stanley, "Fractal dynamics in physiology: Alterations with disease and aging", Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 99, pp. 2466-2472, 2002.
- [4] A.L. Goldberger, C.K. Peng, A.L. Lipsitz, "What is physiologic complexity and how does it change with aging and disease?", Neurobiology of Aging, vol. 23, pp. 23-26, 2002.
- [5] P. C. Ivanov, L. A. N. Amaral, A. L. Goldberger, S. Havlin, M. G. Rosenblum, Z. R. Struzik, H. E. Stanley, "Multifractality in human heartbeat dynamics." Nature, vol. 399(6735), pp 461-465, 1999.
- [6] B.B. Mandelbrot and J.A. Wheeler, "The Fractal Geometry of Nature", American Journal of Physics, vol. 51, pp 286-287, 1983.
- [7] H. M. C. Mary, D. Singh, K.K. Deepak, "Fractal analysis on biomedical signal, in Artificial Intelligence in Biomedical and Modern Healthcare" Informatics Chapter 46, M.A. Ansari, R.S. Anand, P. Tripathi, R. Mehrotra, Md B. B. Heyat, Academic Press, 2025, pp. 485-490.
- [8] A. Afdala, N. Nuryani and A. S. Nugroho, "Automatic Detection of Atrial Fibrillation Using Basic Shannon Entropy of RR Interval Feature", IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series vol. 795, p. 012038, 2017.
- [9] E. Gospodinova, M. Gospodinov, Mitko, M. Negreva, "Nonlinear Dynamics Methods for Analysis of ECG Signals", Proceedings of the 21st International Conference on Computer Systems and Technologies, Association for Computing Machinery, NY, USA, pp. 194-200, 2020.
- [10] L.A. Goldberger, "Non-linear dynamics for clinicians: chaos theory, fractals, and complexity at the bedside", Lancet, vol. 347, pp. 1312-14, 1996.
- [11] N.A. Trayanova "Whole-heart modeling: Applications to cardiac electrophysiology and electromechanics." Circulation Research, vol. 108, pp. 113-128, 2011.
- [12] A. Sciricini, D. Ramoni, L. Liberale, F. Montecucco, F. Carbone F, "The role of artificial intelligence in cardiovascular research: Fear less and live bolder," Eur. J. Clin. Invest., vol. 55, p. e14364, April 2025.
- [13] V. Atanasoski, J. Petrović, L. Popović Maneski, M. Miletić, M. Babić, A. Nikolić, D. Panescu and M. D. Ivanović, "A morphology-preserving algorithm for denoising of EMG-contaminated ECG signals", in IEEE Open J. Eng. Med. Biol., vol. 5, pp. 296-305, 2024.
- [14] J. Pan, W. J. Tompkins, "A Real-Time QRS Detection Algorithm", IEEE Trans. Biomed. Eng., vol. 32, pp. 230-236, 1985.
- [15] S. N. Bhat, G.D. Jindal, M. Xavier, R.D. Wagh, K. S. Garje, G. D. Nagare, "Poincare plot A simple and powerful expression of physiological variability", MGM J. Med. Sci., vol. 8(4), pp 435-441, 2021.
- [16] M. M. Platiša, T. Bojić, S. U. Pavlović, N. N. Radovanović and A. Kalauzi, "Generalized Poincaré Plots-A New Method for Evaluation of Regimes in Cardiac Neural Control in Atrial Fibrillation and Healthy Subjects", Front. Neurosci., vol. 10, article 38, Feb. 2016.
- [17] J. Zheng, G. Fu, K. Anderson, H. Chu and C. Rakovski, "A 12-Lead ECG database to identify origins of idiopathic ventricular arrhythmia containing 334 patients", Sci. Data, vol. 7, 98, 2020.
- [18] D. Stojanovic, V. Atanasoski, M. Ivanovic, N. Zlatić, N. Mujovic, M. Marinkovic, D. Vukajlovic, J. Petrovic, "CUZU-PVC dataset", Mendeley Data, V1, 2023, <http://doi.org/10.17632/f6m5kwf489.1>
- [19] H. Leutheuser, S. Gradl, B.M. Eskofier, A. Tobola, N. Lang, L. Anneken, S. Achenbach, "Arrhythmia classification using RR intervals: Improvement with sinusoidal regression feature", IEEE 12th International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN), 2015, <https://doi.org/10.1109/BSN.2015.7299371>.
- [20] H.E. Stanley, L.A.N. Amaral, A. L. Goldberger, "Scaling and universality in animate and inanimate systems", Physica A: Stat. Mech. Appl., vol. 231, pp. 20-48, 1996.
- [21] D. Sorente, "Critical Phenomena in Natural Sciences", Springer Series in Synergetics, No.2, pp 123-160, 2006.
- [22] H. Fujisaka and T. Yamada, "Stability theory of synchronized motion in coupled-oscillator systems", Progr. Theor. Phys., 69, No. 1, 32, 1983.
- [23] U. Frisch, "Turbulence: The Legacy of A. N. Kolmogorov", Cambridge University Press, Cambridge, pp 296, 1995.

ABSTRACT

In this paper, we investigate various heart rhythms by applying the formalism and theory of complex systems to ECG signals. The results show that metrics based on RR intervals, heart rate variability, and Shannon entropy can be used to distinguish periodic from non-periodic rhythms, while periodic rhythms are further classified according to the heart rate. Quantities that take into account also signal amplitudes, such as parameters of Poincaré plots and multifractal spectra, provide new information and indicators of ECG signal complexity, and thus represent potential new biomarkers of arrhythmias. The presented results are a step towards systematical linking of the dynamic parameters of ECG signals with biomarkers useful in clinical practice.

RHYTHMS OF HEART: SIGNATURES OF COMPLEXITY AND DISORDER IN ELECTROCARDIOGRAPHIC SIGNALS

Jelena Krsic, Aleksandra Maluckov, Danka Stojanovic, Vladimir Atanasoski, Marija Ivanovic, Jovana Petrovic