

Određivanje morfološki karakterističnih PCG segmenata iz slike spektrograma

Ana M. Gavrovska, *Member, IEEE*, Milorad P. Paskaš, Irini S. Reljin, *Member, IEEE*

Sadržaj — Istovremeni trodimenzionalni prikaz fonokardio signala, posmatrajući vreme, amplitudu i frekvenciju, omogućava određivanje morfološki karakterističnih segmenata fonokardiograma, kako kratkih tako i dugačkih sekvenci. Za tu svrhu poslužile su STFT (*Short-Time Fourier Transform*) slike spektrograma. Primenom nekih metoda poznatih iz obrade slike omogućeno je prepoznavanje i izdvajanje osnovnih srčanih zvukova i murmura iz tako formiranih vremensko-frekvencijskih slika. Metoda je testirana na nekoliko karakterističnih test fonokardio signala.

Ključne reči — Fonokardiogram, murmur, STFT, spektrogram, morfološko procesiranje.

I. UVOD

UPOTREBA digitalnih stetoskopa, odnosno dobijanje digitalnog zapisa srčanih zvukova, fonokardiograma (PCG – *phonocardiograms*), omogućava bolji uvid u dijagnostiku srčanih problema u početnoj fazi [1]. Analizom PCG signala, u cilju određivanja morfoloških karakteristika, može se utvrditi moguća hemodinamička anomalija. Za lekare je veoma korisno da na osnovu nekoliko otkucaja srca mogu da odrede potencijalni problem kod ovakvih kvaziperiodičnih signala.

Vremenski domen za analizu PCG-a ne daje uvid u frekvencijski sadržaj komponenata, ali je važan [2] u cilju saznavanja kada se određeni događaj desio, koji je srčani zvuk u pitanju, kao i poreklo murmura, abnormalnih zvukova srca, tzv. srčanih šumova [3,4]. Frekvencijski domen daje uvid u frekvencijski sadržaj PCG-a, ali ne pruža informaciju o tome koje frekvencije su dominantne u kom trenutku, što je neophodno da se okarakterišu odgovarajući događaji. Združena vremensko-frekvencijska analiza omogućava istovremeni pregled oba domena i kao rezultat dobija se trodimenzionalna prezentacija PCG-a. Istovremeni prikaz vremenske, amplitudske i frekvencijske komponente predstavlja odličan način za preciznije određivanje porekla događaja i šuma.

U ovom radu je morfološkim procesiranjem ostvareno izdvajanje osnovnih srčanih zvukova i murmura u

fonokardiogramu. Za tu svrhu su poslužile slike spektrograma kratkovremenske Furijeove transformacije (STFT – *Short-Time Fourier Transform*), o kojima će ukratko biti reči u delu II. Dat je kratak opis osnovnih koncepata morfološkog procesiranja (III deo). U delu IV biće definisan problem koji se ovde želi rešiti. Metoda analize je opisana u poglavlju V, gde je testiranje metode obavljeno nad pet karakterističnih signala sa potvrđenom dijagnozom. Zaključak (VI deo) je posvećen opisu budućih istraživanja.

II. 3D PREZENTACIJA POMOĆU STFT

Kratkovremenska Furijeova transformacija rešava problem vremenske preglednosti pri harmonijskoj analizi nestacionarnih signala. Združenu vremensko-frekvencijsku informaciju je nemoguće dobiti, ali se mogu posmatrati spektralne komponente signala u okviru vremenskog intervala. Uvođenjem odgovarajućih prozorskih funkcija $w(t)$ u vremenskom domenu, uvodi se pretpostavka stacionarnosti signala $x(t)$ u okviru svakog segmenta – prozora, pri čemu se STFT za takav signal određuje kao

$$STFT_x\{\omega, \tau\} \equiv X(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) w(t - \tau) e^{-j\omega t} dt. \quad (1)$$

Što je interval prozora uži, to je vremenska rezolucija bolja a frekvencijska lošija. U diskretnom slučaju, transformacija se računa kao:

$$STFT_x\{\omega, m\} \equiv X(\omega, m) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) w(n - m) e^{-j\omega n}. \quad (2)$$

Istovremena upotreba vremenskog i frekvencijskog domena predstavlja JTFA (*Joint Time-Frequency Analysis*) analizu, dok STFT predstavlja samo jednu od mogućnosti takvog pristupa. Kao rezultat dobija se spektrogram – slika spektralne gustine snage signala $|X(\omega, m)|^2$, koja se često koristi u aplikacijama za audio signale i signale govora [5,6]. Ovde je STFT odabrana za JTFA analizu, jer ona najviše odgovara originalnom izgledu signala posmatrana kroz istovetne vremensko-frekvencijske lokalizacione prozore.

III. UVOD U MORFOLOŠKO PROCESIRANJE

Metode matematičke morfologije nalaze značajnu primenu u obradi slike [7]. Dve operacije, *dilatacija* i *erozija*, su bazične u obradi slike. Dilatacija, u oznaci $A \oplus B$, širi objekte u slici A na osnovu strukturnog elementa B , na sledeći način:

$$A \oplus B = \left\{ z \mid \left(\hat{B} \right)_z \cap A \neq \emptyset \right\}. \quad (3)$$

Ana M. Gavrovska, stipendista Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija; (telefon: 381-11-3370143; e-mail: anaga777@gmail.com).

Milorad P. Paskaš, Inovacioni centar Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija; (telefon: 381-11-3370143; e-mail: milorad.paskas@gmail.com).

Irini S. Reljin, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija; (e-mail: irinitms@gmail.com).

Nasuprot nje, operacija erozije, $A \ominus B$, smanjuje objekte u slici, na sledeći način:

$$A \ominus B = \{z | (B)_z \cap A^c \neq \emptyset\}. \quad (4)$$

Operacije dilatacije i erozije se mogu kombinovati na razne načine, pri čemu su jedne od najčešćih tzv. morfološko otvaranje (*opening*) i zatvaranje (*closing*). Morfološko otvaranje, u oznaci $A \circ B$, predstavlja eroziju praćenu dilatacijom, odnosno $(A \ominus B) \oplus B$, dok se zatvaranje, u oznaci $A \bullet B$, izračunava inverznim redosledom osnovnih operacija $(A \oplus B) \ominus B$.

IV. PROBLEM ODREĐIVANJA SRČANIH DOGAĐAJA

Zbog vizuelnog izdvajanja karakterističnih događaja u okviru PCG signala, u ovom radu su procesirani STFT spektrogrami kao slike, jer osim vremenskih intervala u kojima se dešavaju ti događaji, postoji i njihovo frekvencijsko i amplitudsko razlikovanje.

Za osnovne srčane zvukove (S1, S2, S3, S4) uobičajeno se kaže da su niskofrekventne prirode, dok su srčani šumovi, murmuri, visokofrekventne prirode. Međutim, pomenuta distinkcija je delimično tačna. Postoji veliko preklapanje frekvencijskih opsega ova dva skupa i to predstavlja osnovni problem u detekciji tih anomalija [8,9]. Iz tog razloga, morfološko procesiranje u cilju segmentiranja karakterističnih delova slika PCG spektrograma nije jednostavan zadatak.

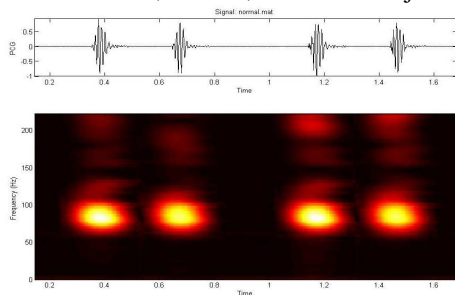
V. METODA ANALIZE

A. Analizirani slučajevi

Za test bazu su upotrebljeni signali fonokardiograma prvog kanala iz [10], frekvencije odabiranja 44.1kHz, pri čemu je izvršena njihova decimacija faktorom 100. Signali su preprocesirani propuštanjem kroz Hamming-ov prozor dužine 128 odbiraka, sa preklapanjem za dva odbirka manje, a zatim su formirani spektrogrami. Nisu uočene znatnije razlike u rezultatima ni za kraće prozore (dužine 64, 32 i 16 odbiraka).

Posmatrali smo signale sa potvrđenih pet dijagnoza: slučaj normalnog signala, stenozе zaliska aorte, mitralne stenozе, mitralne regurgutacije, i aortne regurgutacije.

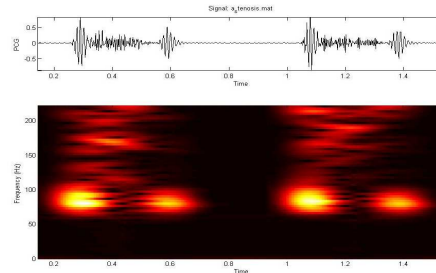
Fonokardiogram normalnog signala i njegov spektrogram su prikazani na Sl.1. Uočavaju se po dva osnovna srčana zvuka, S1 i S2, za dva otkucaja srca.



Sl. 1. Normalan fonokardiogram i njegov spektrogram.

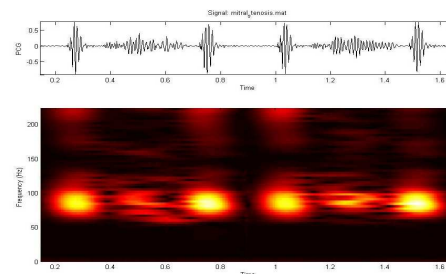
Otkucaj srca se sastoji iz vremenskih intervala koji su određeni sa S1 i S2 i koji se nazivaju: sistola i dijastola. Dijastola predstavlja duži interval od sistole.

Murmur u slučaju stenozе zaliska aorte (Sl.2.) se prepoznaje po mestu nastanka, odnosno za vreme trajanja sistole i to na njenoj sredini. Njegova anelopa je karakterističnog oblika, sa početnom tendencijom porasta, a zatim opadanja.



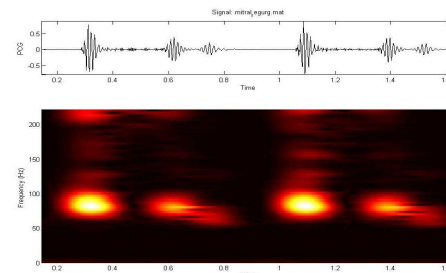
Sl. 2. Signal stenozе zaliska aorte.

Mitralna stenozа ima karakterističan srednjejastolički murmur. Njega karakteriše suženje anelope na sredini dijastole. Na Sl.3. su prikazana dva otkucaja srca u tom slučaju.

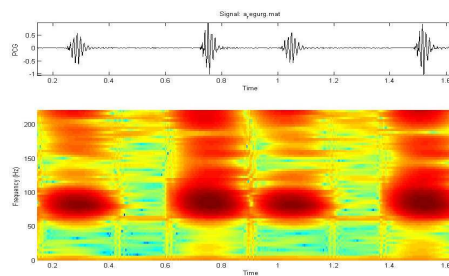


Sl. 3. Signal mitralne stenozе.

Murmur može kontinualno trajati od kraja S1 do početka S2 i tada se naziva potpunim (*holo-*) sistoličkim. U slučaju mitralne regurgitacije, takav murmur je prikazan na Sl.4.



Sl. 4. Signal mitralne regurgitacije.



Sl. 5. Signal aortne regurgitacije.

Rani dijastolički murmur, koji se javlja kod aortne regurgitacije, Sl.5 (gore), lekarima je najteži za detektovanje. Slično je i kod spektrograma, pa je odabrana takva kolormapa na kojoj je on uočljiviji, Sl.5 (dole). Ovaj murmur poseduje tendenciju opadanja od S2.

Na slikama 1-5 je uočljiv problem detekcije srčanih anomalija, o čemu je bilo reči u delu IV. U ovom radu primarni cilj nije bilo prepoznavanje vrste murmura, već pre svega njegovo uočavanje i razlikovanje od osnovnih srčanih zvukova.

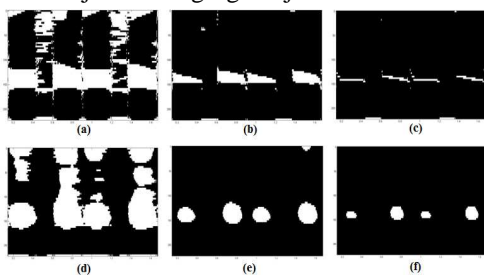
B. Morfološko preprocesiranje spektrograma

Radi izdvajanja osnovnih srčanih zvukova, odnosno relevantnih niskofrekventnih delova spektrograma, kao i relevantnih visokofrekventnih delova, originalan spektrogram se konvertuje u crno-beli mod na šest načina.

Prva tri načina se odnose na pojedinačan rad sa kolonama matrice. U prvom slučaju je prag za svaku kolonu bio njen minimum uvećan za standardnu devijaciju (Sl.6.(a)), u drugom njen maksimum umanjen za standardnu devijaciju (Sl.6.(b)), a u trećem njen maksimum umanjen za dvadeseti deo standardne devijacije (Sl.6.(c)).

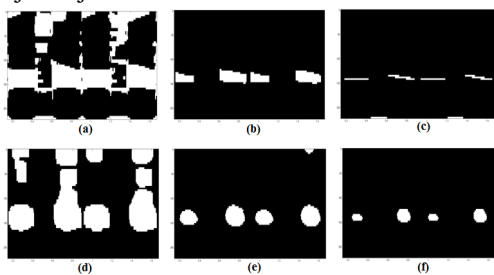
Za sledeća tri načina, fiksni pragovi se postavljaju za cele matrice, i to: minimum maksimalnih vrednosti po kolonama uvećan za minimalnu standardnu devijaciju (Sl.6.(d)), kao i uvećan za maksimalnu standardnu devijaciju (Sl.6.(e)) i maksimalna vrednost matrice umanjena za 150% maksimalne standardne devijacije (Sl.6.(f)).

Ovako je dobijeno šest rezultata sa postavljena dva niska, dva srednja i dva visoka praga u kojima se nalaze svi delovi koji bi mogli biti energetske značajni za svaku kolonu, kao i za celokupnu matricu. Na Sl.6. se oni mogu videti za slučaj aortne regurgitacije.



Sl. 6. (a)-(c) Niski, srednji i visoki prag za crno-beli mod, respektivno, za aortnu regurgitaciju, u radu sa kolonama; (d)-(f) u radu sa celom matricom.

Pre uspostavljanja bilo kakvih korelacija između ovih slika, obavljeno je morfološko preprocesiranje u cilju dobijanja finijih rezultata.



Sl. 7. (a)-(d) Morfološki preprocesirane slike 6.(a)-(d) u slučaju aortne regurgitacije; (e),(f) kao na Sl.6.(e) i (f).

Za Sl.6.(a) je obavljeno morfološko otvaranje i zatvaranje sa kvadratom dimenzije 3x3 kao strukturnim

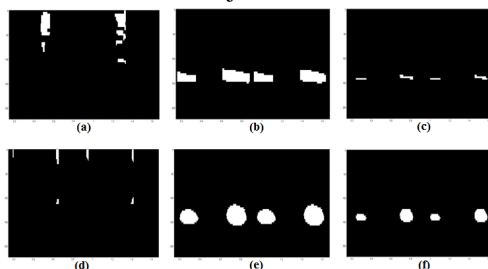
elementom radi uobličavanja prostora koji zauzima murmur (videti Sl.7.(a)). Za Sl.6.(b) obavlja se samo otvaranje sa kvadratom 4x4 (videti Sl.7.(b)), na Sl.6.(c) je primenjeno otvaranje sa horizontalnom linijom dužine deset (Sl.7.(c)), a na Sl.6.(d) je otvaranje sa kvadratom 8x8 (Sl.7.(d)), čime se oslobađamo suvišnih detalja.

C. Rezultati simulacije

Nakon prethodno objašnjenog preprocesiranja na primeru aortne regurgitacije, kao rezultate koje želimo dobiti, izdvojili smo njih 6, i to slike koje sadrže, respektivno:

1. detektovane murmure,
2. razdvojene srčane zvukove,
3. finu detekciju srčanih zvukova u vremenskom domenu,
4. propratne artefakte od srčanih zvukova (sa eventualnim energetski jakim delovima murmura),
5. izdvojene osnovne energetske segmente i
6. prikaz osnovnih srčanih zvukova sa energetskog gledišta.

Algoritam i odgovarajući rezultati biće takođe objašnjeni u slučaju aortne regurgitacije, koja predstavlja težak zadatak za vizuelnu detekciju.



Sl. 8. (a)-(f) Rezultati u slučaju aortne regurgitacije.

Razdvojeni srčani zvukovi (Sl.8.(b)) dobijeni su nakon morfološkog preprocesiranja (videti Sl.7.(b)). Posle konstruisanja niza suma vrednosti iz svakog reda matrice, iz tog niza se izdvaja najduži podniz suma koje su različite od nule, tako da se na Sl.8.(b) prikazuju isključivo redovi matrice koji odgovaraju odabranom podnizu, čime se biraju relevantne niske frekvencije.

Prikaz detektovanih murmura (Sl.8.(a)) sada se može dobiti tako što se redovi i kolone koji odgovaraju razdvojenim srčanim zvukovima (Sl.8.(b)) kod signala odgovarajuće dijagnoze anuliraju u morfološki preprocesiranoj slici sa prethodno postavljenim niskim pragom u radu sa kolonama (Sl.7.(a)). Nakon toga se primenjuje erozija sa strukturnim elementom horizontalne linije dužine 20.

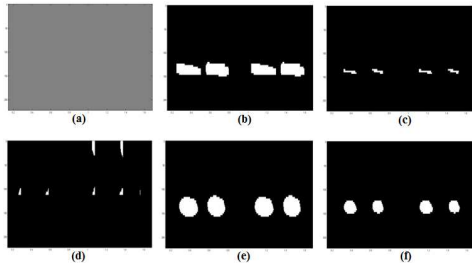
Izdvojene osnovne energetske elemente (Sl.8.(e)) i propratne artefakte (Sl.8.(d)) dobijamo na isti način kao Sl.8.(b) i Sl.8.(a), respektivno, samo pomoću Sl.7.(e) i Sl.7.(d) umesto Sl.7.(b) i Sl.7.(a), respektivno, i bez dodatne primene erozije.

Finija detekcija srčanih zvukova u vremenskom domenu (Sl.8.(c)) dobijena je presekom Sl.7.(c) i Sl.7.(f), dok se prikaz osnovnih srčanih zvukova sa energetskog gledišta (Sl.8.(f)) dobija presekom fine detekcije u vremenskom domenu (Sl.8.(c)) i Sl.7.(b).

Kao što se može videti na Sl.8.(a)-(f), algoritam u

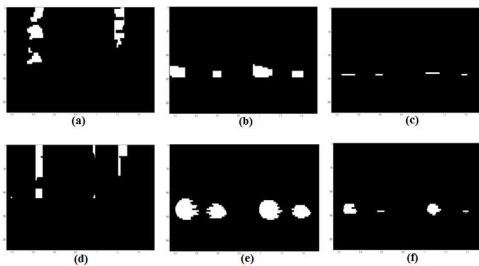
slučaju aortne regurgitacije daje odlične rezultate.

Na Sl.9.(a)-(f) prikazani su rezultati, prethodno opisani, za normalni signal. Posmatrajući konkretan normalni signal u vremenskom domenu ne bi moglo sa sigurnošću da se kaže da ne poseduje neki potencijalni murmur, ali u spektrogramu, primenom opisane metode, nikakav murmur nije izdvojen, što je očekivan rezultat.

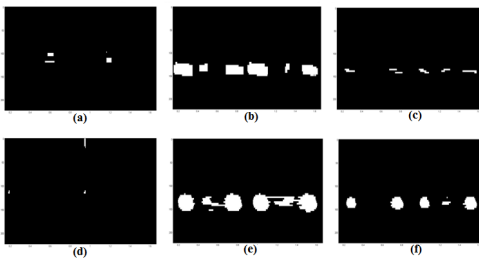


Sl. 9. (a)-(f) Rezultati za normalan signal.

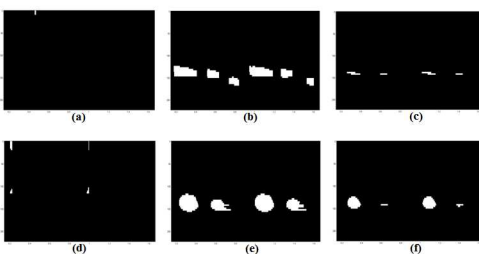
Rezultati za stenozu zaliska aorte mogu se videti na Sl.10.(a)-(f). Murmuri i osnovni srčani zvukovi su takođe odlično razdvojeni. Nije teško razdvojiti samo artefakte osnovnih srčanih zvukova od murmura pomoću Sl.10.(a) i Sl.10.(d).



Sl. 10. (a)-(f) Rezultati za stenozu zaliska aorte.



Sl. 11. (a)-(f) Rezultati za mitralnu stenozu.



Sl. 12. (a)-(f) Rezultati za mitralnu regurgitaciju.

Signal mitralne stenozе je sadržao murmur pretežno niskofrekventne prirode, ali je uočljivo na Sl.11.(a) da je detektovano da postoje murmuri.

Na Sl.12.(a) je slučaj kod koga drugi holosistolčki murmur nije vidljiv, ali se može uočiti jasno razlikovanje srčanih zvukova S1 i S2 od ostalih niskofrekventnih srčanih

dogadaja.

Ovako predložen metod dao je odlične rezultate u detekciji postojanja murmura i uspostavljanju zadovoljavajuće preciznih vremenskih trajanja osnovnih srčanih zvukova. Potrebno je izvršiti još finija podešavanja u tom pogledu i uspostaviti različite kriterijume za različite srčane zvukove (npr. za S1 i S2).

VI. ZAKLJUČAK

Multirezolucijskom analizom se mogu istovremeno dobiti bolja vremenska i frekvencijska rezolucija u slučaju nelinearnih efekata sa brzim i kratkim promenama. U tu svrhu je potrebno izvršiti poređenje raspoloživih JTFA metoda i odgovarajućih spektrograma.

Osim toga, budući rad je namenjen daljem istraživanju analitičkih metoda i karakteristika PCG signala. Metode veštačke inteligencije, napredne metode segmentacije i prepoznavanja, predstavljaju načine sabiranja ovih rezultata u oblasti kvantitativne fonokardiografije.

LITERATURA

- [1] M.I.Gabriel Khan, *On Call Cardiology*, Edition 3, Elsevier Health Sciences, 2006, pp. 30-50.
- [2] A.Gavrovska, D.Jevtić, "Detekcija oblika murmura u fonokardiogramu u vremenskom domenu", *Zbornik radova 53. Konferencije za ETRAN, EK2.2-1-4*, Vrnjaska Banja, Jun 2009,
- [3] F.Javed, P.A.Venkatachalam, A.Fadzil, "A signal processing module for the analysis of heart sounds and heart murmurs", *Journal of Physics, International MEMS Conference*, Series 34, 2006, pp. 1098-1105.
- [4] A.K.Abbas, R.Bassam, *Phonocardiography Signal Processing*, Synthesis Lectures on Biomedical Engineering, University of Connecticut, Morgan&Claypool Publishers series, 2009.
- [5] L.R.Rabiner, R.W.Scafner, *Digital Processing of Speech Signals*, Prentice Hall Signal Processing Series, 1978.
- [6] A.V.Oppenheim, R.W.Schafer and J.R.Buck, *Discrete-Time Signal Processing*, 2nd Edition, Prentice-Hall Signal Processing Series, 1999.
- [7] R.C.Gonzalez, R.E.Woods and S.L.Eddins, *Digital Image Processing Using MatLab*, Prentice Hall, 2004, pp. 334-377.
- [8] S.S.Tripathy, "System for diagnosing valvular heart disease using heart sounds", submitted thesis, Department of Computer Science&Engineering, Indian Institute of Technology, India, June, 2005.
- [9] H.Jeharon, A.Seagar and N.Seagar, "Feature extraction from phonocardiogram for diagnosis based on expert system", in *Proc.27th Annu. International Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC '05)*, Shanghai, China, September 2005.
- [10] Cardiothoracic Surgery of Savannah, Test Heart Sounds (Available: http://www.openheartsurgery.com/heart_sounds.html).

ABSTRACT

The three-dimensional presentation of phonocardiatic signal, considering time, amplitude and frequency, simultaneously, allows the determination of morphological characteristic segments in phonocardiogram, both in short and long sequences. For this purpose, the STFT (*Short-Time Fourier Transform*) spectrogram images were used. By applying some methods known from image processing it is possible to recognize and extract basic heart sounds and murmurs from such time-frequency images. The method is tested over several characteristic test phonocardiatic signals.

DETERMINATION OF MORPHOLOGICALLY CHARACTERISTIC PCG SEGMENTS FROM SPECTROGRAM IMAGE

Ana M. Gavrovska, Milorad P. Paskas, Irini S. Reljin