

INTELIGENTNI EKG MONITOR: DETEKCIJA VARIJABILNOSTI SRČANOG RITMA PRIMENOM DYADIC WAVELET TRANSFORMACIJE U REALNOM VREMENU

Ratko Petrović, Dubravka Bojanić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*
Dejan B. Popović, *SMI, Dept. of Health Science and Technology, Aalborg University, Denmark, ETF, Beograd*

Sadržaj – Cilj istraživanja je bila integracija naših ranijih rezultata na razvoju komponenti virtuelnog EKG monitora i teleEKG monitora. Rad prikazuje implementaciju algoritma za detekciju QRS kompleksa baziranog na dyadic wavelet transformaciji u virtuelni EKG uređaj. Algoritam je i primenljiv u off-line režimu (na već snimljenim EKG signalima), i u realnom vremenu pri snimanju EKG-a. Algoritam omogućuje jednostavniji rad lekara, ali i potencijalno može da bude alarmni sistem u kućnom okruženju

1. UVOD

Razvoj algoritama za automatsku obradu EKG signala (ekspertnih sistema) prati potrebe za dobrom i brzom dijagnostikom koja bi ukazivala na probleme u radu srca. U osnovi ovih algoritama je detekcija QRS kompleksa. Algoritam za detekciju QRS kompleksa prikazan u [1] koristi *dyadic wavelet* transformaciju (DyWT). U ovom istraživanju je algoritam implementiran u programski deo virtuelnog EKG uređaja [2] koji smo razvili. Algoritam se primenjuje na već snimljene signale kako je i pokazano u radu [1], a ovde prikazujemo implementaciju u virtuelni EKG monitor i testiranje u realnom vremenu pri standardnom EKG monitoringu. Na ovaj način smo napravili važan korak u razvoju inteligentnog teleEKG uređaja [3].

Algoritam [1] omogućava detekciju QRS kompleksa u EKG signalima koji je konataiminiran šumom (interferencija mrežnog napajanja, usled kontrakcije mišića - EMG, kontakti potencijal elektroda-telo, artefakt pokreta, DC ofset).

2. INTEGRACIJA ALGORITMA U VIRTUELNI EKG UREĐAJ

Virtuelni EKG uređaj za telemedicinske primene prikazan u [2] je uređaj zasnovan na standardnom PC računaru, koji omogućavava praćenje, snimanje, obradu i arhiviranje EKG signala. Primenom savremenih internet tehnologija, uređaj ima mogućnosti i telemedicinskih primena, pre svega u monitoringu i akviziciji EKG signala na daljinu. Virtuelni EKG uređaj urađen je koristeći programski paket LabVIEW. LabVIEW je grafički programski jezik, funkcije i podprogrami nazivaju se virtuelni instrumenti i predstavljaju se ikonice. Podprogrami, funkcije i drugi elementi u LabVIEW povezuju se linijama koje se nazivaju tokovi podataka (*data flow*). Način programiranja u LabVIEW uveliko podseća na grafički prikazu algoritama,

pa je samim tim i olakšana njihova implementacija u ovom programskom alatu. U okviru LabVIEW-a nalazi se veliki broj alata i gotovih funkcija za analizu i obradu digitalnih signala, i oni će biti korišćeni pri implementaciji algoritma. Program uključuje nekoliko celina koje zasebno vrše: monitoring i prikaz EKG signala, obradu i analizu snimljenih signala u *off-line* režimu, i telemetriju.

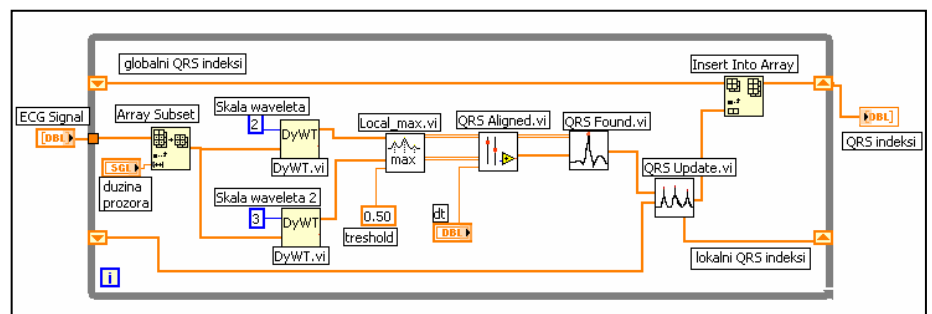
Snimljeni signali se mogu naknadno obrađivati u okviru dela aplikacije koji se naziva *ECG Viewer*. Ovakav pristup *off-line* obradi snimljenih EKG signala omogućuje da se implementiraju različiti algoritmi za analizu i obradu signala. Algoritam opisan u [1] integrisan je u okviru dela virtuelnog EKG uređaja zvanog *ECG Viewer*. Ovaj deo korisničkog programa odvojen je od monitorskog dela EKG aplikacije, i obezbeđuje interfejs za prikaz, analizu i obradu arhiviranih signala.

Na slici 1. prikazan je deo LabVIEW programskog koda nazvan *QRS Detector.vi* koji implementira algoritam [1]. Na ulaz podprograma *QRS Detector.vi* dovodi se snimljeni EKG signal. Deo po deo signala zadate dužine prozora se izdvaja i dovodi na podprogram nazvan *DyWT.vi*. U ovom podprogramu EKG signal se analizira pomoću *Hammingove* prozorske funkcije, a potom se na njega primenjuje DyWT:

$$DyWT_{x_w}(\tau, 2^i) = \frac{1}{\sqrt{2^i}} \int_{-\infty}^{\infty} x_w(t) g^* \left(\frac{t-\tau}{2^i} \right) dt \quad (1)$$

Funkcija $g(t)$ bira se kao jedna od Gausovih wavelet funkcija sa parnim indeksom jer su one pogodnije za detekciju lokalnih minimuma i maksimuma. Koeficijenti DyWT se računaju za dyadic skale $a = 2^i, i = i_n, i_{n+1}, \dots, i_N$. Početni (i_n) i krajnji (i_N) indeks se biraju na osnovu spektra EKG signala, frekvencije sa kojom je izvršeno odabiranje i odabrane wavelet funkcije [1]. Za širinu prozora uzima se vrednost $M=2^K$, gde K minimalni ceo broj za koji važi: $2^K > 2f_s$ (f_s je frekvencija odabiranja). Preklapanja susednih prozora su 75%.

Kako je i opisano algoritmom, koriste se dve wavelet



Sli. 1. Deo LabVIEW koda *QRS Detector.vi* kojim je implementiran algoritam

skale, tako da po jedan virtuelni instrument $DyWT.vi$ vrši izračunavanje po jednoj skali. U okviru ovog virtuelnog instrumenta korišćene su standardna LabVIEW funkcije: *Hamming window* i konvolucija za računanje izraza predstavljenog formulom (1). Na izlazu podprograma $DyWT.vi$ dobijaju se koeficijenti *wavelet* transformacije. Oni se dovode na ulaz sledećeg virtuelnog instrumenta $Local_max.vi$ (slika 1). U ovom virtuelnom instrumentu se za svaku skalu određuju lokalni maksimumi funkcije $|DyWT_x(\tau, 2^i)|$, a potom i globalni maksimum (najveći lokalni maksimum) na tekućem segmentu. Zadaje se vrednost *praga* koja se množi sa globalnim maksimumom i na taj način se formira granični nivo, odnosno prag odlučivanja na osnovu koga se utvrđuje da li je neki lokalni maksimum potencijalni QRS kompleks. Vrednosti lokalnih maksimuma se porede sa pragom, a lokacije potencijalnih QRS kompleksa će postati lokacije onih lokalnih maksimuma koji su prešli prag [1]. Izlaz virtuelnog instrumenta $Local_max.vi$ su parovi lokacije potencijalnih QRS kompleksa sa vrednošću njihovih koeficijenata, za svaku skalu. U LabVIEW kodu to je predstavljeno sa 2D nizovima. Ove vrednosti se dovode dalje na ulaz podprograma $QRS_Aligned.vi$.

Virtuelni instrument $QRS_Aligned.vi$ ispituje koji detektovani maksimumi mogu da odgovaraju stvarnim QRS kompleksima, dobijenih sa dve *wavelet* skale. Algoritam dalje proverava koji se potencijalni QRS kompleksi na dve sukcesivne skale 2^i i 2^{i+1} nalaze na približno istim pozicijama tj. koji su uravnati. Pozicije pikova sa dve susedne skale se porede, a koji pik će se sa kojim upariti bira se po kriterijumu da je rastojanje između njih što manje. Dodatni uslov da su dva pika uravnata je da je razlika između njihovih pozicija manja od $MA_{dist} = 0.1s$:

$$|t_{p_i} - t_{p_{i+1}}| < MA_{dist} \quad (2)$$

Trajanje od 0.1 sekunde je izabrano kao interval između dva validna QRS kompleksa zbog činjenice da ono ne može da bude manje od 0.2s (*refractory period*). Ako lokacije pikova nisu unutar 0.1 sekunde oni se odbacuju. Sledi izbacivanje nepotrebnih parova kako se jedan isti potencijalni QRS kompleks ne bi našao u više parova. I u ovom slučaju kriterijum je minimalno rastojanje između pozicija pikova.

Nakon ovoga treba obezbediti da lokacija potencijalnog QRS kompleksa postane lokacija pika sa skale na kojoj je bio veći $|DyWT|$ u trenutku njegove pojave. Za svaki par pikova (p_i i p_{i+1}) računa se i srednja vrednost modula $DyWT$ koeficijenata u trenucima pojave pikova:

$$\bar{c} = \frac{|c(t_{p_i})| + |c(t_{p_{i+1}})|}{2} \quad (3)$$

Ona se množi sa eksponencijalnom funkcijom tako da najveću težinu dobije par čije se pozicije pikova razlikuju u najmanjem broju odbiraka. Na ovaj način svakoj poziciji potencijalnog QRS kompleksa pridružuje se težinski faktor (tf):

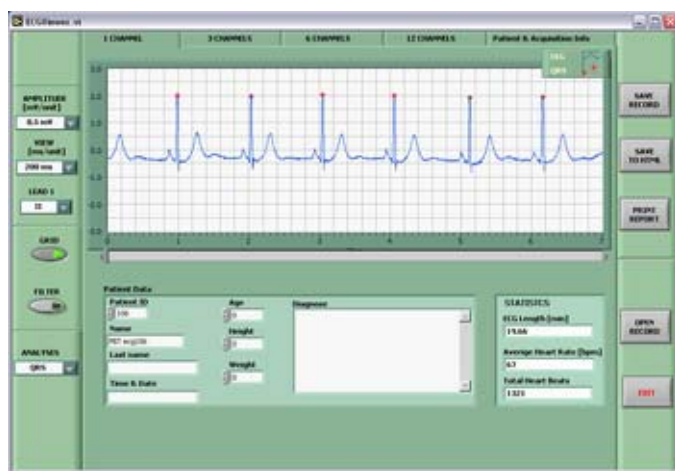
$$tf = \frac{|c(t_{p_i})| + |c(t_{p_{i+1}})|}{2} \cdot \exp\left(-\frac{|t_{p_i} - t_{p_{i+1}}|}{MA_{dist}}\right) \quad (4)$$

Uravnati QRS kompleksi formiraju parove pozicija na kojima su se pojavili tako da se na izlazu virtuelnog instrumenta $QRS_Aligned.vi$ dobijaju parovi pozicija potencijalnih QRS kompleksa, predstavljenih dvodimenzionalnim nizom, i niz težinskih faktora koji odgovaraju svakom paru.

Virtuelni instrument $QRS_Found.vi$ dalje pretražuje parove potencijalnih QRS kompleksa da bi se proverilo da li se više pikova našlo u *refractory* periodu od 0.2 sekunde. *Refractory period* je interval koji sledi neposredno iza QRS kompleksa i unutar tog intervala srčani mišić ne može tako da se pobudi da izazove novi QRS kompleks. Ako postoji više pikova u *refractory* periodu onda se proverava koji ima najveći težinski faktor i samo se on zadržava u QRS vektoru. Na ovaj način sprečava se detekcija lažnih pikova. Ako algoritam ne pronađe ni jedan QRS kompleks proglašava se da nema QRS-ova na datom segmentu i prelazi se na novi.

Lokacije odabranih QRS kompleksa se prosleđuju ka poslednjem virtuelnom instrumentu $QRS_Update.vi$. Ovaj virtuelni instrument upoređuje detektovane QRS komplekse u poslednjoj iteraciji sa onima izračunatim u prethodnim iteracijama (prozorima). Ako je neki QRS kompleks detektovan na više segmenata (što je za očekivati jer se prozori preklapaju), onda se za konačnu lokaciju pojave QRS-a uzima ona koja je u okviru svog segmenta bila bliže sredini prozora. Na izlazu se dobijaju lokacije pronađenih QRS kompleksa dodaju se globalnom nizu koji čuva pozicije detektovanih QRS kompleksa. Takođe QRS kompleksa koji su pronađeni u poslednjoj iteraciji se prosleđuju u sledeću iteraciju (korišćenjem *shift registar*), da bi se upoređili sa novoodređenima i proverila njihova validnost. Kada se dođe do kraja EKG signala, podprogram se završava, a izlaz je niz čiji su elementi lokacije detektovanih QRS kompleksa na celoj dužini signala.

Niz pozicija detektovanih QRS kopompleksa se



Sl.2. Izgled programa ECG Viewer u kome je prikazan obrađen EKG signala i obeleženi QRS kompleksi

prosleđuje dalje u program *ECG Viewer*, gde se koristi za obeležavanje R zubaca. Na slici 2. prikazan je izgled aplikacije *EKG Viewer*, kada je uključena analiza za prepoznavanje QRS kompleksa. Na slici se vidi da su svi QRS kompleksi koji su detektovani obeleženi tačkama crvene boje, da bi bili uočljivi. Pored detekcije R zubaca, program računa i statistiku, kolika je dužina EKG snimka, srednja

vrednost srčanog ritma i ukupan broj srčanih otkucaja/detektovanih QRS kompleksa.

3. IMPLEMENTACIJA ALGORITMA U REALNOM VREMENU

Prethodno prikazana implementacija algoritma izvršena je u delu virtuelnog EKG uređaja koji se koristi pri pregledanju i analizi arhiviranih EKG signala, u *off-line* režimu. Pri standardnom EKG monitoringu postoji potreba za računanjem i prikazivanjem trenutne srčane frekvencije [4]. Algoritmi za detekciju standardnih QRS kompleksa koji se primenjuju u *on-line* režimu, koriste se najčešće za izračunavanje osnovnog srčanog ritma. Dobijene vrednosti služe sa signalizaciju i alarmiranje poremećaja ritma opasnih po život, pre svega usporen srčani ritam (bradikardija), ubrzan srčani ritam (tahikardija) ili izostanak ritma (asistola). Detektovani QRS kompleksi se koriste i kao referentne tačke za algoritme koji vrše analizu srčanih aritmija i različitih fenomena u EKG signalu [4]. Primenjeni u realnom vremenu ovi algoritmi zahtevaju i duži vremenski interval EKG signala za obradu, najčešće duži od 5 sekundi [4].

Pri implementaciji algoritma za primene u realnom vremenu (*on-line*) uvedene su neke modifikacije. Kada se zadaje praga uvedena je modifikacija u odnosu na zadavanje graničnog nivoa. Pre svega zadaje se globalna vrednost praga, koja važi za svaki prozor. Ovo se odnosi na mogućnost pojave izostanka QRS kompleksa u delu signala koji se propušta kroz algoritam. Mnogi proizvođači daju specifikacije za svoje algoritme, koji zahtevaju minimum amplitude QRS kompleksa od 0.5mV [5]. Stoga je postavljen globalni prag u odnosu na minimalnu vrednost koju mora da ima QRS kompleks da bi se detektovao. Lokalni maksimumi na segmentu EKG signal koji se obrađuju moraju biti iznad zadatog nivo globalnog praga. Na taj način je izbegnuta detekcija pojava u EKG signalu koji mogu biti prouzrokovana smetnjama i šumovima, a izostali su QRS kompleksi (asistola).

Druga modifikacija algoritma unesena je u programskom delu u podprogramu *QRS_Update.vi*. U ovom podprogramu upoređuju se novodobijene pozicije QRS kompleksa sa ranije detektovanim. Na osnovu ovih vrednosti računa se srčani ritam preko razlike RR intervala. Širina prozora EKG signala koja se koristi pri prolasku kroz algoritam obezbeđuje detekciju najčešće više od jednog QRS kompleksa. U slučaju da QRS kompleks nije detektovan u jednoj iteraciji, biće detektovan u sledećim, a vrednosti prethodne iteracije se prosleđuju u sledeću i koriste se za sračunavanje srčanog ritama. Ovakav pristup omogućava da se pri svakom proračunu srčane frekvencije računa srednja vrednost ritma na osnovu informacija sa trenutnog i prethodna tri intervala [5]. Na taj način se obezbeđuje manje oscilacije vrednosti srčanog ritma pri prikazu u realnom vremenu, jer se ova vrednost osvežava na svakih jednu ili dve sekunde, a može i ređe.

Deo virtuelnog EKG uređaja koji se naziva Virtuelni EKG monitor je aplikacija koja služi za praćenje i snimanje EKG signala u realnom vremenu [2]. U ovom delu uređaja implementiran je virtuelni instrument *QRS_Detector.vi* uz minimalne modifikacije za primenu u realnom vremenu. Virtuelni instrument obezbeđuje informaciju o detektovanim QRS kompleksima, na osnovu kojih se računa trenutni srčani ritam. Ova vrednost se ispisuje na displeju virtuelnog EKG monitora, a dobijeni rezultati mogu se koristiti za detekciju poremećaja srčanog ritma i alarmantnih situacija.

4. ZAKLJUČAK

Razvili smo programsku komponentu virtuelnog uređaja za EKG monitoring. Osnovu programa daje naš originalni algoritam koji se bazira na detekciji QRS kompleksa koristeći *dyadic wavelet* transformaciji i koristeći LabVIEW programsku podršku. Algoritam je testiran na EKG signalima iz baze MIT-BIH[6], kao i u realnom vremenu. Rezultati testiranja unapređenog EKG monitora su u potpunom skladu sa rezultatima prikazanim u [1], u kome je primenjen programski paket MatLab u *off-line* režimu. Uređaj je testiran i na realnim EKG signalima (*on-line* režim) i utvrđeno je da je određivanje srčanog ritma u realnom vremenu u granicama od 99.53% procenata. Informacije koje daje algoritam (detektovani QRS kompleksi) mogu biti korišćene za implementaciju algoritama za prepoznavanje i signalizaciju alarmantnih poremećaja srčanog ritma kao što su bradikardije, tahikardije ili asistola.

LITERATURA

- [1] Dubravka Bojanić "Detekcija QRS kompleksa u EKG signalu korišćenjem dyadic wavelet transformacije", Magistarska teza, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2003.
- [2] R. Petrović "Virtuelni EKG uređaj za telemedicinske primene", Magistarska teza, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2004.
- [3] Popović, D.B, Bojanić D, Jorgovanović N, Došen S, Petrović R, "Teleecg Based On Bluetooth Transceivers", IX Telekomunikacioni forum TELFOR 2001, Beograd, 20-22.11.2001.
- [4] Z.L. Božović, S.S. Kun, A.Z. Stojiljković, "Mogućnosti računarske analize neinvazivno dobijenih EKG signala", Centar za multidisciplinarnu studiju Univerziteta, Beograd, 1997.
- [5] Cardiocap II, Clinical monitors, Datex-Ohmeda www.datex-ohmeda.com
- [6] MIT-BIH ECG database, Massachusetts Institute of Technology, <http://ecg.mit.edu>

ZAHVALNICA

Rad na ovom projektu je delimično finansiran sredstvima Ministarstva za nauku u zaštitu životne sredine Srbije i Danish National Research Foundation, Denmark.

Abstract – We developed the new intelligent virtual ECG monitor by integrating the dyadic wavelet based algorithm for detection of QRS complex into the virtual tele-ECG. The new VI was realized by using LabVIEW software. The system operates for real-time detection of the variability of the heart rhythm, and for off-line analysis of the previously recorded signals or off-line analysis when using the system via Internet. The new system allows the physician to locate fast and affective episodes in long-term ECG recordings (Holter), but also provides the patient with an ECG alarm system.

INTELLIGENT ECG MONITOR: REAL-TIME HEART RATE VARIABILITY MONITORING WITH THE VIRTUAL ECG DEVICE

Ratko Petrović, Dubravka Bojanić, Dejan B. Popović