

ŠIRDIES DŪŽIŲ NUSTATYMAS IŠ IŠKRAIPYTŲ EKG SIGNALŲ ATLIEKANT AUTOMATIŠKAI APTIKTŲ ATSKAITŲ STATISTINĘ ANALIZĘ

Andrius GUDIŠKIS

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas
El. paštas andrius.gudiskis@vgtu.lt*

Santrauka. Širdies ritmas yra vienas svarbiausių ir daugiausia informacijos apie pacientų būklę teikiančių fiziologinių parametru. Širdies ritmas nustatomas iš elektrokardiogramos (EKG), atliekant QRS regionų, kurie yra interpretuojami kaip širdies dūžio atskaitos, paiešką. QRS regionų aptikimas yra klasikinis uždavinys, nagrinėjamas jau keletą dešimtmečių, todėl širdies dūžių nustatymo iš EKG signalų metodų yra labai daug. Deja, šie metodai tikslūs ir patikimi tik esant dideliame signalo ir triukšmo santykiui. Kai EKG signalai labai iškraipomi, QRS aptiktuvai ne visada gali atskirti QRS regioną, o kartais jį randa ten, kur iš tikro jo būti neturėtų. Straipsnyje siūlomas algoritmas, kurį taikant sumažinama triukšmo įtaka nustatant iš EKG signalų QRS regionus. Tam naudojamas QRS aptiktuvai, kartu prognozuojantis širdies dūžio atskaitą. Remiamasi arterinio kraujo spaudimo signalo duomenimis, renkama atskaitų statistika ir atliekama jos analizė.

Reikšminiai žodžiai: elektrokardiograma, arterinis kraujo spaudimas, širdies ritmas, QRS regionai, širdies dūžis.

Įvadas

Straipsnyje nagrinėjama širdies dūžių (angl. *heart beats*) automatinio nustatymo iš iškraipytų EKG signalų problema. Automatiškai širdies dūžiai dažniausiai nustatomi naudojant QRS regionų aptiktuvą (angl. *detector*). Tiriant ilgus trukmės EKG signalus visada yra tikimybė, kad EKG signalas bus iškraipytas triukšmo, atsirandančio dėl fiziologinių arba kitų, išorinių, veiksnių. Tokiais atvejais QRS aptiktuvo rezultatų tikslumas sumažėja – didėja tikimybė, kad širdies dūžis užfiksuotas klaidingai. Jei iškraipymų dinaminė charakteristikų ir EKG signalo charakteristikų parametrai panašūs, iš signalo aptinkami papildomi (klaidingai fiksuojami) širdies dūžiai. Siekiant užtikrinti širdies veiklos stebėjimo patikimumą, aptiktų širdies dūžių perteklius turėtų būti atskirtas ir pašalintas.

Triukšmų įtakai EKG signalams įvertinti G. M. Friesenas su bendraautorais (Friesen *et al.* 1990) atliko tyrimus, taikydami devynis skirtingus QRS algoritmus. Šių tyrimų metu iš triukšmo iškraipyto signalo buvo nustatytas klaidingai aptiktų širdies dūžių atskaitų skaičius ir įvertintas aptikimo vėlinimas. Šie parametrai buvo vertinami atliekant eksperimentus specialia įranga su tikru EKG signalu, gautu stebint savanorį. Triukšmas, iškraipantis signalą, buvo sintezuojamas. Rezultatai parodė, kad nė vienas iš tirtųjų algoritmų negali aptikti visų QRS at-

skaitų teisingai – dalį atvejų labiau tiko algoritmai, grįsti amplitudės ir nuolydžio (angl. *slope*) analize, kitais atvejais geresni rezultatai gauti taikant algoritmus, kuriuose skaitmeniniai filtrai.

S. Palas ir M. Mitra (2012) pasiūlė metodą, generuojantį vidinių modų funkcijas (angl. *Intrinsic Mode Function*), jį pavadino empirinės modos dekompozicijos metodu (angl. *Empirical Mode Decomposition*). Šiuo metodu žemesnės eilės modų funkcijos, kurioms įtakos turi triukšmas, pašalinamos, pritaikant viršūnių korekciją. Tai panaikina aukštojo dažnio triukšmą tiriamajame signale. Atrinktas modos funkcijų rinkinys, kuris atstoja QRS sritį, tiesiškai transformuojamas, dėl to QRS regionas aptinkamas tiksliau. Eksperimentai buvo atliekami naudojant realius signalus, paimtus iš *PhysioNet* duomenų bazės (Physionet 2014). Eksperimentų rezultatai parodė, jog pasiūlytu metodu QRS atskaitos aptinkamos tiksliau nei tokiems uždaviniams spręsti dažnai naudojant algoritmus taikančius Butterworth filtrą.

Q. Xue su bendraautorais yra pasiūlęs adaptyvaus sutapdinto filtravimo algoritmą, grįstą dirbtinių neuronų tinklų taikymu QRS atskaitoms aptikti (Xue *et al.* 1992). Adaptyvusis dirbtinių neuronų tinklo filtras naudojamas žemesnio dažnio EKG komponentėms, kurios visuomet

yra netiesinės ir nepastovios, modeliuoti, kita dažnio komponentių dalis praleidžiama pro tiesinį sutapdinimo filtrą, siekiant aptikti QRS kompleksinę dedamąją. Balinimo dirbtinių neuronų tinklo filtras efektyviai pašalina iš EKG signalų laikui bėgant kintantį triukšmą, kurio charakteristika netiesinė. Atliekant eksperimentus šiuo metodu buvo naudojami signalai, paimti iš *MIT-BIH* duomenų bazės (Physionet 2014).

Šie signalai buvo paveikti triukšmo pirminio įrašymo metu. Tiriant juos adaptatyviojo sutapdinto filtravimo algoritmo aptikimo tikslumas siekė 99,5 %, tiesinio adaptatyviojo balinimo filtro, paverčiančio signalą baltuoju triukšmu, tikslumas buvo mažesnis – 97,5 %, juostinio filtravimo – 96,5 %.

F. Scholkmannas ir kiti (Scholkmann *et al.* 2012) pasiūlė automatinį daugiamatį viršūnių aptikimo metodą, grįstą lokalių maksimumų skalogramos skaičiavimu ir analize. Metodo efektyvumas įvertintas pagal realius EKG signalus, nepaveiktus triukšmo. Minėtomis sąlygomis algoritmo tikslumas 100 %. Neseniai buvo pasiūlytas dar vienas metodas – modelio sutapdinimo algoritmas (Nakai *et al.* 2014), skirtas QRS atskaitos aptikimo triukšmo paveiktuose EKG signaluose klaidoms išvengti. Bangos formos ruošinys yra generuojamas autonomiškai trumpos trukmės autokoreliacija grįstu metodu. Atliekant tyrimus su realiais signalais, paimtais iš *MIT-BIH* duomenų bazės, konstatuota, kad pasiūlytas algoritmas, nustatant QRS atskaitas tiriant triukšmo paveiktus EKG signalus, siekė vidutiniškai 98,3 % tikslumą.

Šiame straipsnyje pateikiamas sprendimas yra grįstas laikui bėgant kintančių impulsinės prigimties signalų (kraujo spaudimo, fotopletizmogramos signalų) požymių taikymu širdies dūžio atskaitoms (aptiktoms automatinės QRS kompleksų paieškos EKG signaluose metodu) taisyti iškraipytuose EKG signalo fragmentuose.

Metodai

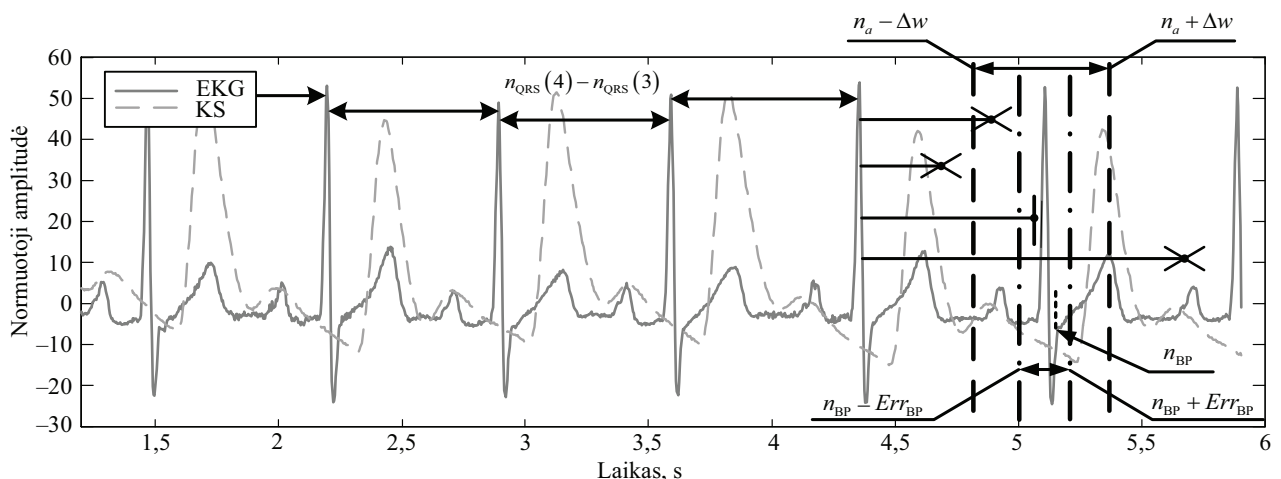
Siūlomas algoritmas klasifikuoja EKG signaluose QRS aptiktuviu nustatytas širdies dūžių atskaitas ir taiso atskaitų vietas triukšmo paveiktuose signaluose pagal širdies dūžio atskaitas, aptiktas kraujo spaudimo signalu, taikant pasirinktą kraujo spaudimo signalų periodiškumą aptikimo algoritmą.

QRS kompleksams aptikti naudotas aptiktuvas (Pan, Tompkins 1985), kuris signalui taiko 5–15 Hz juostinį filtrą ir atlieka kiekvieno pretendento, galimai klasifikuojamo kaip QRS kompleksinę atskaitą, nuolydžio, pločio ir amplitudės analizę. QRS aptikimo algoritmas EKG periodiškai atnaujina ribines vertes ir parametrus, taikydamasis prie EKG signalo pokyčių, susijusių su QRS morfologija.

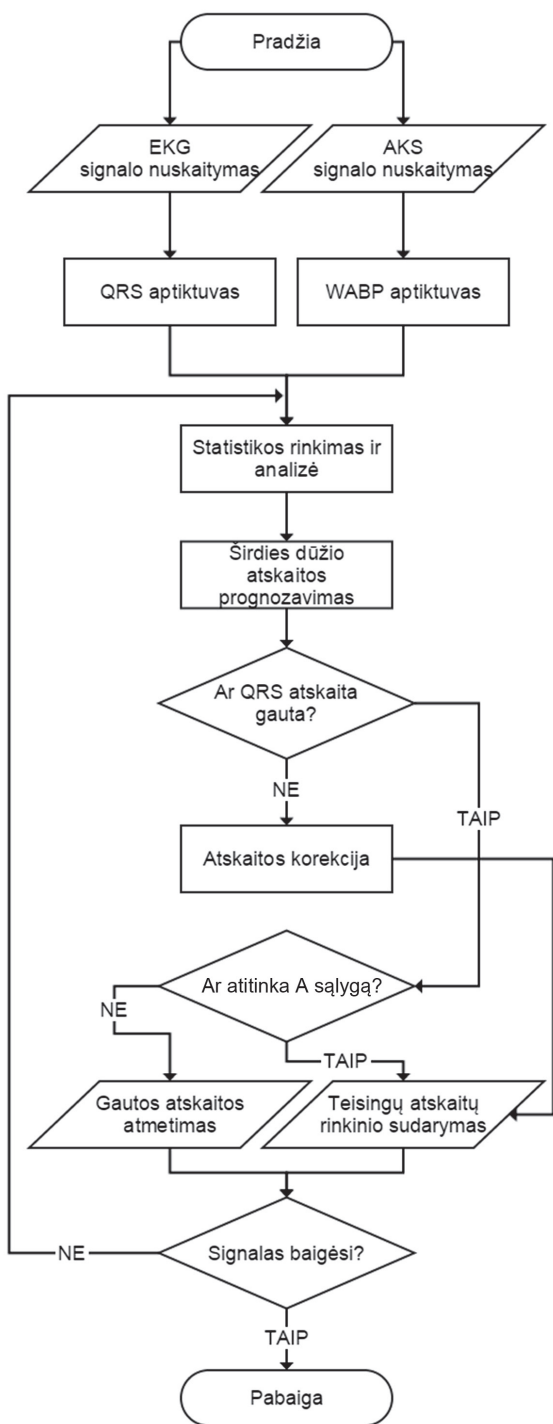
Požymiams, pagal kuriuos galima būtų prognozuoti širdies dūžio atskaitą EKG signalu, rasti taikytas *WABP* algoritmas (Zong *et al.* 2003), išskiriantis impulsus arterinio kraujo spaudimo signalu. Šis algoritmas grįstas signalo bangos formos pirmosios eilės išvestinės skaičiavimu ir analize, atliekant žemųjų dažnių filtravimą ir skaičiuojant nuolydžio sumų funkcijas. *WABP* algoritmas pritaikytas suaugusiojo žmogaus kraujo spaudimo signalų analizei ir geriausiai veikia signaluose, kurių diskretizavimo dažnis yra 125 Hz.

Siūlomas širdies dūžio atskaitų analizės algoritmas skirtas QRS aptiktuvo (Pan, Tompkins 1985) randamoms QRS atskaitoms patikslinti. Analizuojama kiekviena naujai gauta širdies dūžio atskaita ir pagal pasiūlytą algoritmą priimamas arba atmetamas QRS aptiktuvo gautas rezultatas. Šio algoritmo principas pateiktas 1 ir 2 pav. kaip širdies dūžių atskaitų klasifikavimo ir koregavimo algoritmo grafinis vaizdas bei schema.

Prieš sprendžiant, priimti ar atmeti rastą širdies dūžio atskaitą, būtinas nusistatyto dydžio ankstesnių atskaitų rinkinys. Darant prielaidą, jog pirmosios EKG signalo



1 pav. Siūlomo algoritmo principo grafinis vaizdas
Fig. 1. Graphical representation of proposed algorithm



2 pav. Širdies dūžių atskaitų klasifikavimo ir koregavimo algoritmo schema

Fig. 2. Heartbeat annotation classification and adjustment flowchart

matavimų sekundės yra be signalo iškraipymų, pirmosios QRS aptiktuvo rastos širdies dūžio atskaitos laikomos teisingomis.

Iš M sėkmingai aptiktų širdies dūžio atskaitų išvedamas vidurkis siekiant rasti tikėtiniausią laiko, kai yra prognozuojama kita širdies dūžio atskaita, atskaitą n_c . Atskaita, rasta QRS aptiktuvo, atitinkanti A sąlygą

$n_{QRS} \in [n_c - \Delta_{\min}, n_c + \Delta_{\min}]$, yra priimama ir pridedama prie galimų kitos teisingos atskaitos pretendentų sąrašo n_c . Atskaita, gauta anksčiau, nei nustatyta ribinė prognozuojamos atskaitos atsiradimo laiko paklaidos vertė $n_c - \Delta_{\min}$, yra laikoma pertekline ir atmetama. Jei atskaita gaunama vėliau, nei nustatyta ribinė vertė $n_c + \Delta_{\min}$, tada atskaita yra koreguojama – laikoma, kad tiriamu laiko momentu $n_c = n_c$. Atrinktos galimai teisingos širdies dūžio atskaitos n_c yra papildomai palyginamos su atskaitomis, gautomis analizuojant kraujo spaudimo signalą. Jei atstumas tarp atskaitos pretendentu n_c ir kitos kraujo spaudimo signalo prognozuojamos atskaitos n_{BP} neviršija atskaitos aptikimo paklaidos – atitinka sąlygą $n_c \in [n_{BP} - Err_{BP}, n_{BP} + Err_{BP}]$, tada n_c yra įrašomas į sėkmingai atrinktų atskaitų sąrašą n_a . Kitu atveju prognozuojama atskaita n_c yra įrašoma į sėkmingai aptiktų atskaitų sąrašą vietoje n_c atskaitos.

Kai sėkmingai atrinktų atskaitų sąrašė atsiranda nauja atskaita, prognozuojama atskaita kiekvieną kartą yra įvertinama iš naujo, imant M paskutinių atskaitų rinkinį. Šios atskaitos taip pat taikomos kaip n_a atvejais, kai QRS algoritmo aptikta atskaita n_{QRS} nepatenka į rėžį, atitinkanti teisingai aptiktos atskaitos sąlygą.

Kiekvienos algoritmo iteracijos metu tada, kai sudaromas pirminis nustatyto dydžio teisingų atskaitų rinkinys, teisingos širdies dūžio atskaitos nustatymo paklaidos ribos yra atnaujinamos taikant statistinę analizę. Δ_{\min} ir Δ_{\max} ribos atnaujinamos sudarant atstumų tarp teisingai aptiktų širdies dūžio atskaitų branduolio glotninimo (angl. *Kernel Smoothing*) tikimybių skirstinį, skaičiuojamą pagal Epanečnikovo funkciją, ir atrenkant verčių, esančių į kairę ir į dešinę nuo skirstinio maksimalios vertės, skaičių. Err_{BP} riba atnaujinama perskaičiuojant atstumus tarp naujai aptiktų atskaitų arterinio kraujo spaudimo signalo ir išvedant jų vidurkį.

Ekspirimentų rezultatai

Duomenys eksperimentams buvo paimti iš *PhysioNet* duomenų bazės (Physionet 2014) – 100 skirtingų 10 min. trukmės signalų įrašų, gautų stebint suaugusiuosius pacientus, tarp kurių buvo ir asmenų, turinčių sveikatos problemų, ir sveikų. Eksperimentams naudoti tik EKG ir arterinio kraujo spaudimo signalų duomenys.

Algoritmo rezultatų tikslumas buvo vertinamas lyginant keturias skirtingas rastų atskaitų grupes: n_{QRS} – atskaitų, gautų naudojant pasirinktą QRS aptiktuva; n_{BP} – atskaitų, gautų naudojant WABP aptiktuva; n_a – atskaitų, gautų taikant siūlomą algoritmą; n_{EXP} – pagal surinktą ankstesnių priimtų atskaitų (n_a) statistiką mūsų siūlomo algoritmo prognozuojamų atskaitų.

1 lentelė. Eksperimentų rezultatai
Table 1. Results of experiments

Signalas	Rezultatai				
	Nr.	n_{EXP}	n_{QRS}	n_{BP}	n_a
Su triukšmu	10	735	806	686	710
	69	785	797	126	794
	88	841	854	174	840
Be triukšmo	19	741	741	86	741
	35	661	661	168	661
	47	872	872	173	872

Iš eksperimentų rezultatų (žr. 1 lentelę) matyti, kad prognozuojamų atskaitų skaičius, priklausomai nuo signalo ir jame esančio triukšmo, varijuoja plačiai tarp 86–686. Sąsaja tarp atskaitų, gaunamų iš kraujo spaudimo signalų ir EKG signalo iškraipymų, nepastebėta. Daugumoje atliktų eksperimentų pasiūlytas algoritmas priima nuo 99 % iki 100 % širdies dūžio atskaitų, palyginti su ekspertų pateiktais etalonais. Signaluose, kuriuose buvo pastebimi dideli EKG iškraipymai, atmetų atskaitų skaičius padidėjo iki 12 %, tačiau, palyginti su QRS aptiktuvo rastų atskaitų ir ekspertų etalono skirtumu, siūlomo algoritmo rezultatas ir šiuo atveju buvo geresnis.

Išvados

Straipsnyje apžvelgiamas tyrimas, kaip sumažinti triukšmo poveikį nustatant širdies dūžio atskaitas iš iškraipytų EKG signalų. Tyrimai parodė, jog pasirinktas QRS aptiktuvus (Pan, Tompkins 1985) iš triukšmo paveikto signalo randa daugiau širdies dūžio atskaitų, nei jų randama iš to paties paciento kraujo spaudimo signalo taikant *WABP* aptiktuvą. Straipsnyje pateiktas algoritmas, pagal kurį nustatomos širdies dūžių atskaitos naudojant tiek EKG, tiek arterinio kraujo spaudimo signalų duomenis.

Siūlomas algoritmas iš stipriai triukšmo paveiktų EKG signalų tirtais atvejais atmesdavo nuo 2 % iki 12 % atskaitų, kurios turėjo būti priimtose. Palyginti su ekspertų pateiktomis širdies dūžio atskaitomis, atskaitos aptikimo tikslumas buvo iki 6 % didesnis nei naudojant tik QRS aptiktuvą.

Padėka

Dėkoju dr. Artūriui Serackiui už metodinę pagalbą rengiant straipsnį.

Literatūra

Friesen, G. M.; Jannett, T. C.; Jadallah, M. A.; Yates, S. L.; Quint, S. R.; Nagle, H. T. 1990. A comparison of the noise sensitivity of nine QRS detection algorithms, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 37(1): 85–98.

Nakai, Y.; Izumi, S.; Nakano, M.; Yamashita, K.; Fujii, T.; Kawaguchi, H.; Yoshimoto, M. 2014. Noise tolerant QRS detection using template matching with short-term autocorrelation, in *36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 26–30 August 2014, Chicago, USA, 34–37.

Pal, S.; Mitra, M. 2012. Empirical mode decomposition based ECG enhancement and QRS detection, *Computers in biology and medicine* 42(1): 83–92.

Pan, J.; Tompkins, W. J. 1985. A real-time QRS detection algorithm, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 3(1): 230–236.

Physionet. 2014. Multimodal Data: the PhysioNet/Computing in Cardiology Challenge 2014 [interaktyvus], [žiūrėta 2015 m. sausio 12 d.]. Prieiga per internetą: <http://physionet.org/challenge/2014>

Scholkman, F.; Boss, J.; Wolf, M. 2012. An efficient algorithm for automatic peak detection in noisy periodic and quasi-periodic signals, *Algorithms* 5(4): 588–603.

Xue, Q.; Hu, Y. H.; Tompkins, W. J. 1992. Neural-network-based adaptive matched filtering for QRS detection, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 39(4): 317–329.

Zong, W.; Heldt, T.; Moody, T.; Mark, R. G. 2003. An open-source algorithm to detect onset of arterial blood pressure pulses, in *Computers in Cardiology 2003*: 259–262.

HEART BEAT DETECTION IN NOISY ECG SIGNALS USING STATISTICAL ANALYSIS OF THE AUTOMATICALLY DETECTED ANNOTATIONS

A. Gudiškis

Abstract

This paper proposes an algorithm to reduce the noise distortion influence in heartbeat annotation detection in electrocardiogram (ECG) signals. Boundary estimation module is based on energy detector. Heartbeat detection is usually performed by QRS detectors that are able to find QRS regions in a ECG signal that are a direct representation of a heartbeat. However, QRS performs as intended only in cases where ECG signals have high signal to noise ratio, when there are more noticeable signal distortion detectors accuracy decreases. Proposed algorithm uses additional data, taken from arterial blood pressure signal which was recorded in parallel to ECG signal, and uses it to support the QRS detection process in distorted signal areas. Proposed algorithm performs as well as classical QRS detectors in cases where signal to noise ratio is high, compared to the heartbeat annotations provided by experts. In signals with considerably lower signal to noise ratio proposed algorithm improved the detection accuracy to up to 6%.

Keywords: electrocardiogram, arterial blood pressure, QRS complex, heartbeat, heart rate.