

Barbara WILK

POLITECHNIKA RZESZOWSKA, ZAKŁAD METROLOGII I SYSTEMÓW POMIAROWYCH

Wyznaczanie czasu propagacji fali tętna obwodowego

Dr inż. Barbara WILK

Absolwentka Wydziału Elektrycznego Politechniki Budapeszteńskiej, stopień doktora nauk technicznych uzyskała w Instytucie Technologii Elektronowej Politechniki Wrocławskiej w 1995 r. Pracuje jako adiunkt w Zakładzie Metrologii i Systemów Pomiarowych Politechniki Rzeszowskiej. Zajmuje się zagadnieniami dotyczącymi przetwarzania i analizy sygnałów biomedycznych.

e-mail: bmwilk@prz.rzeszow.pl

Streszczenie

W artykule zaprezentowano metodę wyznaczania czasu propagacji fali tętna obwodowego (ang. pulse transit time, PTT), zdefiniowanego jako przedział czasu mierzony od początku fazy skurczu serca do momentu pojawienia się tzw. ramienia wstępującego fali tętna. W metodzie tej wykorzystano sygnał fotopletyzmoграфiczny (PPG) reprezentujący falę tętna obwodowego oraz sygnał fonokardiograficzny (FKG), który umożliwia detekcję faz skurczu i rozkurczu w każdym cyklu pracy serca. W artykule podano także przykłady wykorzystania parametru PTT w diagnostyce medycznej.

Słowa kluczowe: fala tętna obwodowego, czas propagacji, fotopletyzmoграфия, sygnał fonokardiograficzny.

Determination of the peripheral pulse wave transit time

Abstract

In the paper the method for determination of peripheral pulse wave transit time (PTT) (defined as the time delay between the onset of a pulse wave and the systolic period) is presented. This method is based on two signals: photoplethysmographic (PPG) and phonocardiographic (PCG). The PPG signal represents the peripheral pulse wave, while the PCG signal allows detection of the systolic and diastolic phase in each cardiac cycle. The examples of using PTT in medical diagnostics are also given.

Keywords: peripheral pulse wave, transit time, photoplethysmography, phonocardiographic signal.

1. Wprowadzenie

W wyniku wtłaczania krwi do aorty w czasie skurczu lewej komory serca powstaje fala ciśnieniowa, która rozchodzi się od serca aż do naczyń włosowatych [1]. Fala ciśnieniowa wraz z towarzyszącym jej odkształceniem ścian tętnic określana jest jako fala tętna. Na falę tętna ma wpływ objętość wyrzutowa lewej komory serca, parametry krwi oraz fizyczne właściwości tętnic. Prędkość rozchodzenia się fali tętna zależy przede wszystkim od elastyczności ścian tętnic i jest znacznie większa od prędkości przepływu krwi. Odkształcenie ścian tętnicy w czasie przechodzenia przez nią fali tętna może być odbierane za pomocą różnych czujników, przy czym najczęściej wykorzystuje się czujniki fotopletyzmoграфiczne [2]. Na podstawie analizy sygnału reprezentującego falę tętna można wyznaczyć parametry przydatne do oceny układu sercowo-naczyniowego (m.in. do badania mechanizmu regulującego pracę serca oraz do oceny stopnia elastyczności ścian małych i dużych tętnic).

Szczególne znaczenie w diagnostyce medycznej ma czas propagacji fali tętna obwodowego (tzw. parametr PTT), który jest definiowany jako czas potrzebny fali ciśnieniowej (powstającej w czasie skurczu lewej komory serca) na przebycie drogi od serca do wybranego punktu pomiarowego. Zazwyczaj falę tętna obwodowego rejestruje się za pomocą czujnika umieszczonego na palcu kończyny górnej lub dolnej. Wartość czasu propagacji fali tętna

obwodowego zależy nie tylko od odległości dzielącej punkt pomiarowy od serca, ale także od fazy cyklu oddechowego i ciśnienia tętniczego krwi. W związku z tym, podejmowane są próby, aby parametr PTT wykorzystać do ciągłego, nieinwazyjnego monitorowania zarówno ciśnienia tętniczego krwi [3, 4, 5], jak i procesu oddychania. Na podstawie analizy zmienności wartości tego parametru można wyróżnić fazę cyklu oddechowego oraz określić częstotliwość oddychania [6, 7].

W artykule przedstawiono metodę wyznaczania czasu propagacji fali tętna obwodowego na podstawie analizy sygnałów: fotopletyzmoграфicznego (tzw. PPG) reprezentującego falę tętna oraz fonokardiograficznego (tzw. FKG), który wykorzystano do detekcji fazy skurczu serca.

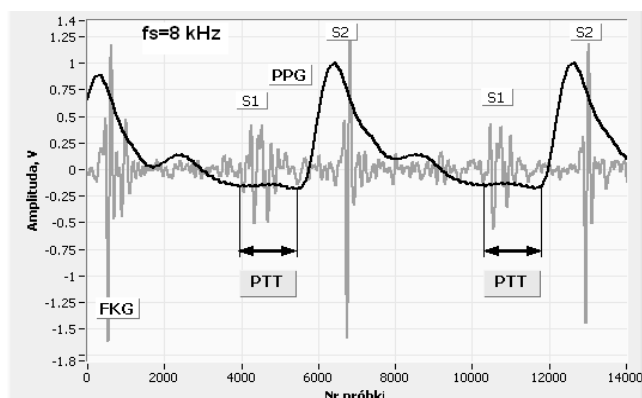
2. Definicja czasu propagacji fali tętna

W celu określenia czasu propagacji fali tętna obwodowego należy zmierzyć odstęp czasu pomiędzy początkiem fazy skurczu serca a momentem pojawienia się fali tętna w wybranym punkcie pomiarowym. Aby wyróżnić fazę skurczu w badanych ewolucjach serca trzeba zarejestrować jednocześnie z falą tętna obwodowego dodatkowy sygnał odniesienia.

Zazwyczaj początek fazy skurczu serca określa się na podstawie lokalizacji czasowej załamka R (lub zespołu QRS) występującego w sygnale EKG [5, 8]. Jednak w tym przypadku nie uwzględnia się czasu opóźnienia elektromechanicznego, tj. interwału czasu mierzony od początku zespołu QRS do chwili zamknięcia zastawek przedsionkowo-komorowych. Fazę skurczu serca można dokładniej zlokalizować, przyjmując założenie, że początek skurczu serca jest związany z momentem zamknięcia się zastawek przedsionkowo-komorowych. W rzeczywistości skurcz komór serca połączony z wyrzutem krwi następuje dopiero po skurczu izowolumetrycznym, tj. po upływie czasu ok. 0,05 s od momentu zamknięcia zastawek przedsionkowo-komorowych [1].

Do detekcji fazy skurczu serca można wykorzystać sygnał fonokardiograficzny (FKG), który obejmuje tony i szmery - sygnały akustyczne generowane podczas mechanicznej pracy serca. Proces zamykania zastawek przedsionkowo-komorowych reprezentuje w sygnale FKG tzw. pierwszy ton podstawowy serca (S1 na rys. 1). Natomiast w wyniku zamykania zastawek aorty i pnia płucnego powstaje drugi ton podstawowy serca (oznaczany jako S2).

Ponadto przyjęto, że moment pojawienia się fali tętna w wybranym punkcie pomiarowym (w czasie trwania ewolucji serca) odpowiada lokalizacji czasowej początku ramienia wstępującego fali tętna.



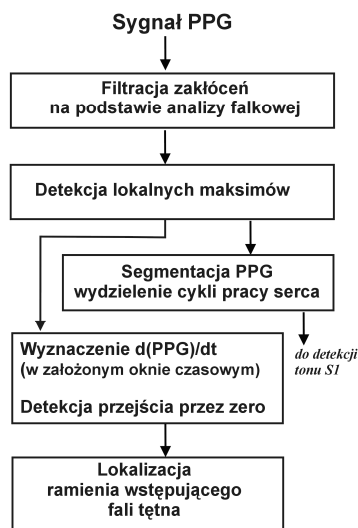
rys. 1. Sygnał reprezentujący falę tętna obwodowego (PPG) oraz sygnał fonokardiograficzny (FKG); częstotliwość próbkowania $f_s=8\text{kHz}$
Fig. 1. Signal representing the peripheral pulse wave (PPG) and phonocardiographic signal (FKG); the sampling frequency $f_s=8\text{kHz}$

3. Akwizycja i przetwarzanie sygnałów pomiarowych

Do jednoczesnej rejestracji fali tętna obwodowego i tonów serca opracowano system pomiarowy, który bazuje na karcie pomiarowej zawierającej 12-bitowy przetwornik A/C. Do odbioru fali tętna obwodowego zastosowano czujnik fotopletyzmoграфiczny (wariant prześwietleniowy), który został umieszczony na palcu ręki badanej osoby. Typowe zakłócenia powstające w wyniku ruchu badanego zostały znacznie ograniczone dzięki unieruchomieniu ręki w czasie pomiarów. Tętno serca zarejestrowano za pomocą stetoskopu z mikrofonem. Zwrócono uwagę, aby dźwięki pochodzące z otoczenia nie zakłócały rejestracji sygnałów akustycznych serca. Pomiarzy przeprowadzono z udziałem kilkunastu zdrowych osób w wieku ok. 24-25 lat.

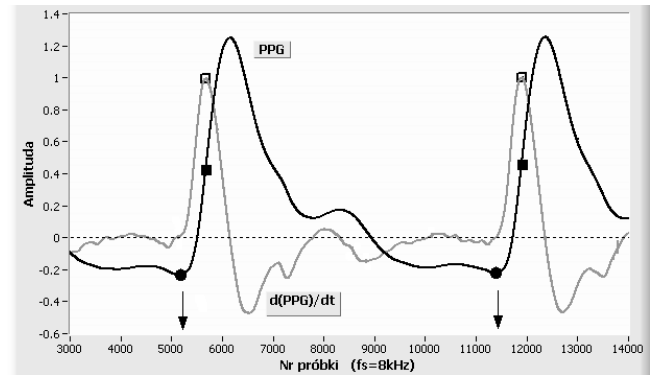
Na rys. 1 przedstawiono przykładowe sygnały pomiarowe PPG i FKG, znamienne dla prawidłowej pracy serca u młodej osoby. Zarejestrowane sygnały PPG i FKG zostały poddane odpowiedniej obróbce, aby można było prawidłowo zlokalizować punkty definiujące odcinek PTT.

Algorytm opracowany do przetwarzania sygnału PPG zaprezentowano na rys. 2.



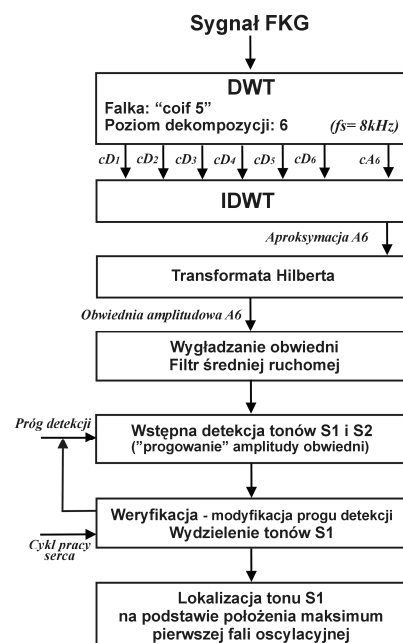
Rys. 2. Algorytm przetwarzania sygnału PPG
Fig. 2. Algorithm of the PPG signal processing

W celu uzyskania dostatecznie gładkiego przebiegu reprezentującego falę tętna obwodowego sygnał PPG został poddany filtracji. Do ograniczenia wpływu zakłóceń i szumu zastosowano metodę progowej eliminacji współczynników rozwinięcia falkowego sygnału PPG. Metoda ta pozwala także na eliminację wolnozmiennego trendu sygnału. Następnie przeprowadzono detekcję maksimów występujących w każdym okresie sygnału PPG. Do realizacji tego zadania opracowano detektor, który bazuje na aproksymacji wielomianem drugiego stopnia wartości próbek sygnału PPG leżących w okolicy wartości szczytowej, powyżej założonego progu. Sygnał PPG podzielono na segmenty odpowiadające poszczególnym ewolucjom serca. Lokalizacja ramienia wstępującego fali tętna przebiega na podstawie analizy zmian wartości pierwszej pochodnej sygnału PPG. Analizowane są próbki sygnału PPG znajdujące się w oknie czasowym o założonej długości, które poprzedza wcześniej zlokalizowane maksimum. Na rys. 3 przedstawiono wyniki detekcji ramienia wstępującego fali tętna, tj. punkty przejścia przez zero pierwszej pochodnej sygnału PPG (w zadanym oknie czasowym). Na rys. 3 wyróżniono także próbki, dla których szybkość zmian sygnału PPG jest największa. Błąd lokalizacji czasowej początku ramienia wstępującego fali tętna nie powinien przekroczyć wartości $\pm 3 \cdot T_s$ (gdzie T_s oznacza okres próbkowania).



Rys. 3. Wyznaczanie początku ramienia wstępującego fali tętna obwodowego
Fig. 3. Determination of the onset of the peripheral pulse wave

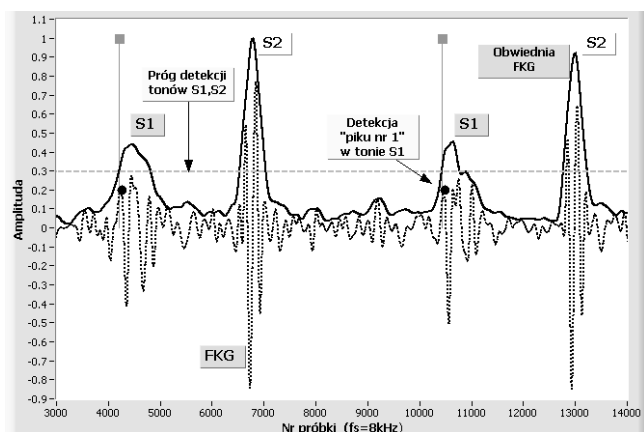
Algorytm do detekcji pierwszego tonu podstawowego przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Algorytm przetwarzania sygnału FKG
Fig. 4. Algorithm of the PCG signal processing

Lokalizację tonów podstawowych serca S1 i S2 przeprowadzono na podstawie analizy obwiedni amplitudowej niskoczęstotliwościowej składowej sygnału FKG, którą uzyskano w wyniku wielorozdzielczej dekompozycji sygnału FKG za pomocą algorytmu Mallata [9]. Dekompozycję zrealizowano przy użyciu falki „coif 5”. W przypadku, gdy sygnał FKG jest próbkowany z częstotliwością 8 kHz (lub 11 kHz), to aproksymacja sygnału FKG na poziomie szóstym (tj. A6) reprezentuje tylko ton podstawowy serca. Za pomocą transformaty Hilberta wyznaczono obwiednię amplitudową aproksymacji A6. Następnie wygładzono obwiednię wykorzystując filtr średniej ruchomej. Detekcja tonów podstawowych serca (S1 i S2) polega na „progowaniu” amplitudy uzyskanej obwiedni. Rezultaty detekcji zależą w dużej mierze od wartości progu detekcji. Gdy obwiednia nie jest dostatecznie gładka i wartość progu detekcji zbyt mała, to mogą być wykryte dodatkowe, „nieistniejące” tony. Natomiast niektóre z tonów serca mogą zostać pominięte, gdy wartość progu detekcji jest zbyt duża. A zatem wyniki detekcji muszą być poddane weryfikacji. Jako kryterium weryfikacji przyjęto wartość odstepu czasu pomiędzy tonami S1 i S2 oraz informację o podziale sygnału PPG na segmenty odpowiadające poszczególnym ewolucjom serca. W celu odrzucenia „fałszywych” tonów operacja „progowania” amplitudy obwiedni przeprowadzana jest ponownie z podwyższonym progiem detekcji. Natomiast, gdy liczba wykrytych tonów jest mniej-

sza niż dwa, to operacja „progowania” amplitudy obwiedni zostaje powtórzona przy obniżonym progu detekcji. Podczas tej weryfikacji zostają wydzielone wszystkie tony S1. W ostatnim etapie przetwarzania sygnału FKG następuje dokładne określenie lokalizacji tonu S1 w każdym cyklu pracy serca. Przyjęto, że jest to chwila czasu, w której pierwsza fala oscylacyjna występująca w tonie S1 osiąga wartość maksymalną (rys. 5). Do detekcji szczytu fali oscylacyjnej wykorzystano opisany wcześniej detektor, który zapewnia dużą dokładność lokalizacji maksimum. Błąd lokalizacji wartości maksymalnej fali oscylacyjnej nie powinien przekroczyć wartości $\pm T_s$.



Rys. 5. Wyznaczanie początku pierwszego tonu podstawowego serca (S1)
Fig. 5. Determination of the onset of the 1st heart sound, S1

4. Podsumowanie

W artykule zaprezentowano metodę wyznaczania czasu propagacji fali tętna obwodowego znamiennego dla punktu pomiarowego znajdującego się na palcu kończyny górnej lub dolnej.

Czas propagacji fali tętna obwodowego określa się na podstawie analizy wcześniej zarejestrowanych sygnałów fonokardiograficznego i fotopletyzmoğraficznego, jako opóźnienie fali tętna obwodowego wyrażone w odniesieniu do początku fazy skurczu serca. Detekcja fazy skurczu w każdym cyklu pracy serca bazuje na lokalizacji czasowej pierwszego tonu podstawowego serca.

Dokładność wyznaczania czasu propagacji fali tętna obwodowego zależy przede wszystkim od dokładności lokalizacji dwóch charakterystycznych punktów definiujących ten interwał czasu, tj.

od detekcji: ramienia wstępującego fali tętna i pierwszego tonu podstawowego serca. Oszacowano, że w przypadku niezakłóconych sygnałów FKG i PPG znamienych dla prawidłowej pracy serca, całkowity błąd wyznaczania PTT nie powinien przekroczyć wartości $\pm 4 \cdot T_s$.

Opracowana metoda umożliwia także badanie relacji czasowych zachodzących pomiędzy falą tętna obwodowego a drugim tonem podstawowym serca. Opóźnienie czasowe fali dykrotycznej wyrażone w odniesieniu do początku fazy rozkurczu serca zawiera istotne informacje diagnostyczne o wpływie fali odbitej na wartość ciśnienia tętniczego krwi.

W ramach dalszych badań przewiduje się przeprowadzenie oceny dokładności tej metody z uwzględnieniem m. in.:

- patologicznych przebiegów FKG,
- wpływu typowych zakłóceń występujących podczas rejestracji sygnałów pomiarowych PPG i FKG,
- wpływu tachykardii.

5. Literatura

- [1] W.F. Ganong: Podstawy fizjologii lekarskiej. PZWL, Warszawa 1994.
- [2] A. Cysewska-Sobusiak: Modelowanie i pomiary sygnałów biooptycznych. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2001.
- [3] J.Y.A. Foo, S.J. Wilson, P. Wang: Factors that affect pulse wave time transmission in the monitoring of cardiovascular system. *Journal of Clinical Monitoring and Computing*, 2008, vol. 22, pp. 141-147.
- [4] J.Y.A. Foo, C.S. Lim, W. Ping: Evaluation of blood pressure changes using vascular transit time. *Physiological Measurement* vol. 27, No. 8, Aug. 2006, pp. 685-694.
- [5] K. Meigas, J. Lass i in.: Method and device for beat - to - beat blood pressure measurement. *Proceedings of the 3rd European Medical and Biological Engineering Conference*, 2005, Prague, CD- ROM.
- [6] M. Yin, M. Nakayama i in.: How much influence does inspiration have on pulse transit time in sleep apnea? *Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, 2008, vol. 138, pp. 619-625.
- [7] J.Y.A. Foo: Pulse transit time in pediatric respiratory sleep studies. *Medical Engineering & Physics*, 2007, vol. 29, pp. 17-25.
- [8] J.E. Naschitz, S. Bezobchuk, R. Mussafia-Priselac i in.: Pulse transit time by R-wave-gated infrared photoplethysmography: review of the literature and personal experience. *J Clin Monit Comput* 2004, vol.18, pp. 333-342.
- [9] B. Wilk: Wirtualny stetoskop do badania tonów podstawowych serca. *PAK*, 2007, vol. 53, Nr 12, str. 46-47.

Artykuł recenzowany

INFORMACJE

Zapraszamy do publikacji artykułów naukowych w czasopiśmie PAK

WYDAWNICTWO POMIARY AUTOMATYKA KONTROLA
ul. Świętokrzyska 14A, pok. 530, 00-050 Warszawa,
tel./fax: 022 827 25 40

Redakcja czasopisma POMIARY AUTOMATYKA KONTROLA
44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, pok. 30b,
tel./fax: 032 237 19 45, e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl