

CIĄGŁY MODEL SZUMU ELEKTROKARDIOGRAMU W DZIEDZINIE CZASOWO-CZĘSTOTLIWOŚCIOWEJ

Piotr Augustyniak

Katedra Automatyki AGH, 30-059 Kraków, Mickiewicza 30,
e_mail: august@biocyb.ia.agh.edu.pl, tel. 617-38-51, fax. 634-15-68
praca finansowana ze źródeł KBN nr grantu: 8 T11E 007 17

Streszczenie

W artykule opisana jest metoda modelowania szumu w elektrokardiogramie w sposób ciągły w oparciu o współczynniki dekompozycji czasowo-częstotliwościowej rzeczywistego sygnału. Metoda wykorzystuje określone automatycznie odcinki zapisu reprezentujące fizjologicznie udokumentowany brak aktywności elektrycznej serca. Na odcinkach tych obliczane są współczynniki poziomu i barwy szumu reprezentujące jego lokalne własności widmowe. Opisany model szumu może być podstawą prowadzonych na bieżąco obliczeń stosunku sygnału do szumu oraz adaptacyjnych metod odszumiania i kompresji elektrokardiogramu w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej.

Abstract

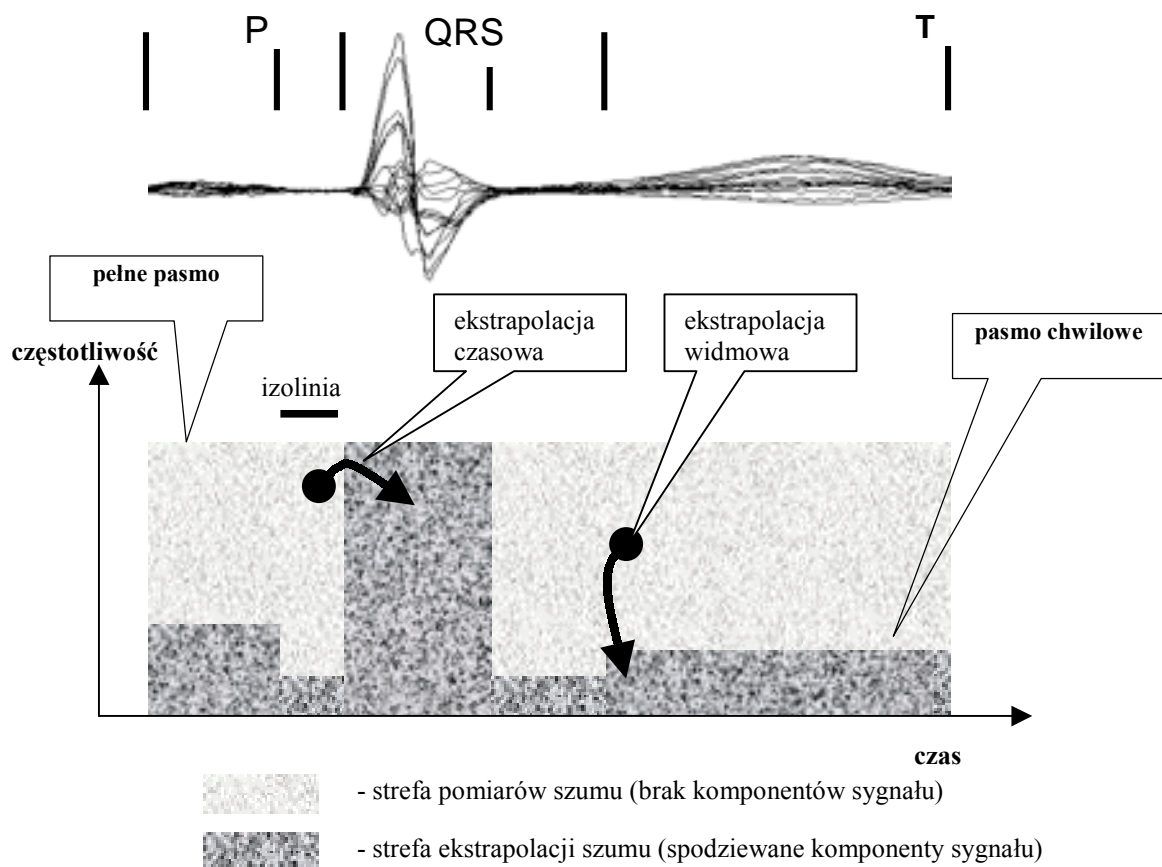
This paper describes a new method of ECG noise modelling based on time-frequency decomposition coefficients of a real signal. Automatically derived waves start- and endpoints are used to determine segments of electrical inactivity of the heart. For those segments, as we assumed containing only the noise, the noise model parameters: level (energy) and colour (spectral properties) are computed. The noise model presented hereby may be useful for continuous signal-to-noise ratio estimation or even for adaptive denoising and compression of an electrocardiogram in time-frequency domain.

1. Wstęp

Rejestracja elektrokardiogramu coraz rzadziej odbywa się w ściśle zdefiniowanych warunkach laboratoryjnych. Wymaganiem współczesnej kardiologii jest przede wszystkim zapis całodobowego obrazu aktywności serca oraz w niektórych przypadkach zapis próby wysiłkowej polegający na obciążeniu organizmu wysiłkiem fizycznym [1]. Rejestracja prowadzona w warunkach codziennego życia pacjenta stawia nowe wymagania algorytmom analizy oraz procedurom identyfikacji i eliminacji zakłóceń. Zakłócenia pochodzą zasadniczo z trzech źródeł, z których tylko jedno, aparatura pomiarowa, może być kontrolowane. Pozostałymi źródłami zakłóceń o nieznanym charakterystykach jest środowisko elektromagnetyczne w którym przebywa pacjent oraz aktywność elektryczna pozostałych jego organów. Standardowo, źródła te reprezentowane są przez pojęcia "zakłócenia mięśniowe" i "przydźwięk sieci", które de facto oznaczają cały zespół zakłóceń o trudnych do zdefiniowania charakterystykach. Wynika stąd trudność zbudowania modelu matematycznego zakłóceń w elektrokardiogramie, który byłby dostatecznie bliski rzeczywistości.

Zaproponowana metoda pozwala określić widmowe parametry zakłóceń w elektrokardiogramie, co w większości zastosowań odszumiania i kompresji jest wystarczające. W wielu podobnych zastosowaniach definicja czasowej postaci szumu nie jest niezbędna. Ponieważ zaproponowany model szumu jest ciągły i parametry uaktualniane są na bieżąco, możliwe jest także zbudowanie czasowo-częstotliwościowej postaci modelu szumu.

Do estymacji parametrów widmowych szumu wykorzystano odcinek referencyjny tzw. linii izoelektrycznej pomiędzy końcem załamka P, a początkiem zespołu QRS, który reprezentuje udokumentowany fizjologicznie brak aktywności elektrycznej serca. Niewątpliwą zaletą jest fakt, że współcześnie istniejące oprogramowanie automatycznej analizy EKG pozwala z dużą precyzją i niemal 100% pewnością automatycznie wyznaczyć położenie tego odcinka. Dodatkowym atutem jest fakt, że elektrokardiogram nie zawiera składowych o częstotliwościach przekraczających 32 Hz poza zespołem QRS [2], natomiast częstotliwość próbkowania jest zwykle wyższa niż 128 Hz. Istnienie dwóch oktaw nie zawierających praktycznie użytecznych składowych sygnału przez ponad 80% czasu trwania pozwala modyfikować widmowe parametry modelu szumu także poza odcinkiem izolacji (Rys.1). Częstotliwość uaktualniania parametrów modelu jest 4-krotnie niższa niż częstotliwość próbkowania elektrokardiogramu z wyjątkiem krótkiej, trwającej typowo ok. 100 ms przerwy na zespół QRS. Za uprawnione uważa zatem autor nazwanie zaproponowanego modelu szumu – ciągłym.



Rys. 1. Ciągły model szumu elektrokardiogramu w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej

2. Materiały i Metody

Badanie własności zaproponowanego modelu szumu przeprowadzono na drodze eksperymentu numerycznego. Celem eksperymentu było badanie przebiegu parametrów modelu szumu dla sygnałów zawartych w standardowej bazie danych EKG będącej zbiorem sygnałów referencyjnych o zasięgu światowym.

2.1. Zbiór sygnałów testowych

Źródłem sygnałów testowych była kardiologiczna baza danych CSE zawierająca 10 s odcinki sygnału zarejestrowane z częstotliwością próbkowania 500 Hz. Zaletą tej bazy jest udostępnianie rezultatów wstępnego przetwarzania zapisów potwierdzonych przez kardiologów – w tym także punktów początkowych i końcowych załamków. Pozwala to uniezależnić wynik eksperymentu od jakości pre-procesora, zarówno odcinek linii izoelektrycznej jak i położenie zespołu QRS są wyznaczone obiektywnie. Ponieważ zmienność pasma sygnału użytecznego elektrokardiogramu jest najłatwiejsza do zdefiniowania na czasowo-częstotliwościowej reprezentacji sygnału – wymagane jest użycie bezstratnej transformacji czasowo-częstotliwościowej, np. transformacji falkowej. Dopiero w tej dziedzinie możliwa będzie identyfikacja współczynników reprezentacji czasowo-częstotliwościowej nie niosących istotnych informacji, czyli leżących poza zakresem wyznaczonym przez funkcję chwilowego pasma elektrokardiogramu [3], które są podstawą modyfikacji parametrów widmowego modelu szumu.

2.2. Wybór transformacji czasowo-częstotliwościowej

Wybór użytej transformacji czasowo-częstotliwościowej został dokonany w oparciu o analizę pożądaných własności transformacji:

- jest sprawą fundamentalną użycie transformacji bezstratnej (opartej na dekompozycji ortonormalnej), gdyż warunkuje to prawidłową identyfikację komponentów sygnału,
- transformacja powinna używać filtrów o możliwie krótkim nośniku i wprowadzających minimalne zniekształcenia fazowe

Transformacja użyta w opisywanym algorytmie kompresji wykorzystywała bi-ortogonalne filtry Daubechies 5 rzędu i algorytm dekompozycji piramidowej [4]. Dekompozycja sygnału o oryginalnej częstotliwości próbkowania 500 Hz, została przeprowadzona na trzech poziomach, co umożliwiło wydzielenie oktaw o pasmach: 250...125 Hz, 64...125 Hz i 32...64 Hz. Poniżej 32 Hz zachowano sygnał oryginalny gdyż:

- przeprowadzone badania wykazały mały związek zawartości informacyjnej sygnału z załawkami elektrokardiogramu, istotne komponenty sygnału użytecznego występują w tym zakresie zarówno w obrębie załawków jak i poza nimi,
- efektywna częstotliwość próbkowania wynosi 64 Hz i odpowiadający jej okres (16 ms) jest porównywalny z długością załawków,
- trzy pasma częstotliwościowe estymacji parametrów widmowych szumu uznano za wystarczające do określenia parametrów poziomu i barwy.

2.3. Definicje parametrów modelu szumu

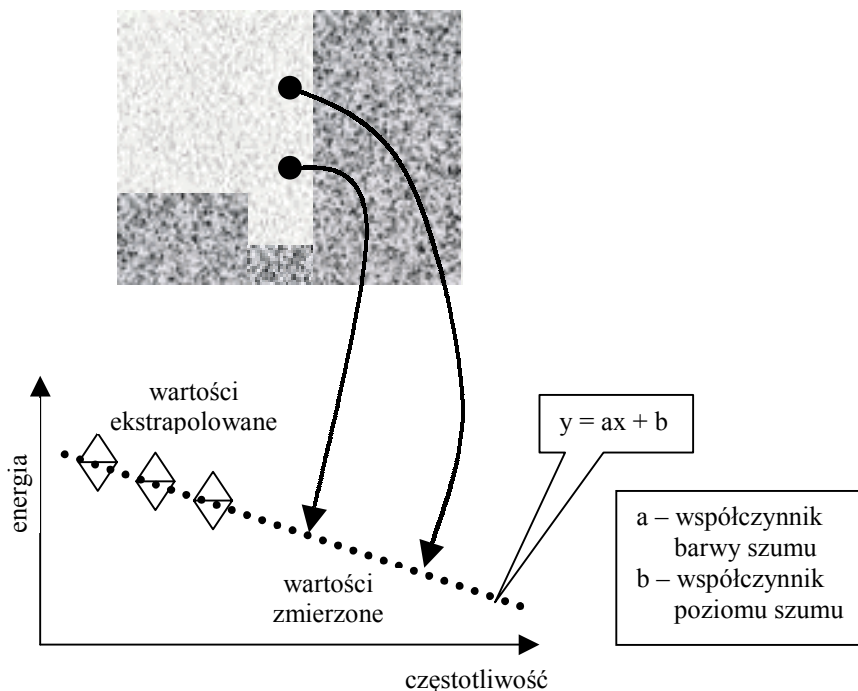
Przekształcenie współczynników powierzchni czasowo-częstotliwościowej leżących poza spodziewanym użytecznym pasmem elektrokardiogramu w parametry prostej estymującej widmo modelowanego szumu wymaga dodatkowo przekształceń uwzględniających:

- zmienną jednostkę czasu wynikłą ze zmiennej rozdzielczości czasowej zastosowanej transformacji czasowo-częstotliwościowej, wymuszającą uśrednianie różnej liczby współczynników zależnie od numeru oktawy,
- zmienną jednostkę częstotliwości wynikłą ze zmiennej rozdzielczości czasowej zastosowanej transformacji czasowo-częstotliwościowej, na wykresie liniowym widma prosta będzie miała kształt krzywej wykładniczej.

Współczynniki prostej $y = ax + b$ określającej lokalne własności widmowe szumów nazwano:

- współczynnik kierunkowy a – współczynnikiem barwy, gdyż definiuje stosunek składowych nisko- i wysokoczęstotliwościowych widma szumu,
- stałą b – współczynnikiem poziomym, gdyż określa lokalną wartość energii szumów.

Konstrukcję modelu szumów elektrokardiogramu na podstawie współczynników powierzchni czasowo-częstotliwościowej ilustruje rysunek 2.



Rys. 2. Szczegóły ekstrapolacji widmowej parametrów modelu szumu

2.4. Podwyższenie częstotliwości uaktualniania parametrów i rzędu modelu szumu

Głównym założeniem była aktualizacja parametrów modelu szumu tylko na izolacji, co określa maksymalną częstotliwość aktualizacji – raz na uderzenie. Ograniczona długość izolacji uniemożliwia dekompozycję sygnału poniżej poziomu, na którym długość atomu powierzchni czasowo-częstotliwościowej przekracza 16 ms. W przypadku bazy CSE próbkowanej z częstotliwością 500 Hz jest to poziom 3. Ilość poziomów dekompozycji, równa ilości pasm częstotliwościowych wyznacza natomiast maksymalną liczbę punktów będących podstawą wyznaczania lokalnych własności widmowych szumu. Mając do dyspozycji trzy punkty rozważano zatem estymację chwilowego widma szumu z użyciem funkcji kwadratowej i liniowej. Ponieważ brak dostatecznie umotywowanych przesłanek dla konieczności użycia funkcji kwadratowej obecnie wykonano jedynie estymację liniową w oparciu o chwilową energię sygnału w dwóch najwyższych oktawach, pozostawiając na przyszłość analizę ewentualnych korzyści płynących z zastosowania estymacji wyższego rzędu. Dodatkowym argumentem technicznym jest tutaj fakt, że częstotliwość próbkowania

elektrokardiogramów długoczasowych rzadko przekracza 250 Hz, pozostawiając nie więcej niż dwie oktawy zapasu pomiędzy pasmem zarejestrowanym a pasmem sygnału użytecznego.

3. Rezultaty

Głównymi rezultatami eksperymentu numerycznego jest określenie stabilności parametrów widmowych modelu szumu przy zaszumianiu elektrokardiogramu testowego szumem stacjonarnym o wartościach 10, 25 i 50 % amplitudy zespołów QRS. Stabilność określono jako wariancję współczynników barwy i poziomu szumu. Otrzymane wartości wynoszą odpowiednio: 27% i 21%. Brak miejsca ogranicza prezentację szczegółowych rezultatów do kilku przykładowych plików (tab. 1).

Tab. 1. Parametry średnie liniowego modelu szumu elektrokardiogramu

nazwa pliku	CSE-1	CSE-2	CSE-3	...	CSE-123	CSE-124	CSE-125
poziom średni b [μV]	43	112	56	...	97	38	22
wariancja poziomu δb [%]	24	12	28	...	7	25	30
barwa średnia a [jedn. niemian.]	-1.23	-2.12	-1.46	...	-2.56	-1.75	-0.97
wariancja barwy δa [%]	23	18	33	...	15	32	41

Przeprowadzony dodatkowo eksperyment polegający na porównaniu (pomiar PRD) sygnału oryginalnego, zaszumionego (jak poprzednio 10, 25 i 50 % amplitudy zespołów QRS) i odszumionego z użyciem zaproponowanego ciągłego modelu szumu w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej pozwolił określić skuteczność i użyteczność zaproponowanego modelu do odszumiania. Średnia wartość PRD zapisów odszumionych w stosunku do zapisów oryginalnych wyniosła 17,8 % średniej wartości PRD zapisów zaszumionych w stosunku do zapisów oryginalnych. Przykładowe rezultaty dla poziomu zaszumiania 10% są przedstawione w tabeli 2.

Tab. 2. Skuteczność odszumiania elektrokardiogramu z użyciem ciągłego modelu szumu i sygnału szumu białego o amplitudzie równej 10% amplitudy sygnału

nazwa pliku	CSE-1	CSE-2	CSE-3	...	CSE-123	CSE-124	CSE-125
PRD1 – odległość sygnału zaszumio- nego od oryginalnego	13.5	11.2	7.6	...	11.4	9.7	7.1
PRD2 – odległość sygnału odszumio- nego od oryginalnego	1.67	2.36	1.11	...	1.99	2.29	1.22
$\Delta\text{PRD} =$ $\text{PRD2} / \text{PRD1}$ [%]	12.4	21.1	14.6	...	17.5	23.6	17.2

4. Dyskusja

Zaproponowano i przetestowano ciągły model szumu elektrokardiogramu w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej polegający na estymacji liniowej parametrów widmowych szumu. Interesujące parametry odszumiania elektrokardiogramu wskazują na celowość implementacji modelu w formie procedury wykonywalnej. Dodatkową trudnością mogą okazać się: znaczna złożoność obliczeniowa, błędy lokalizacji zespołu QRS wprowadzane przez pre-procesor oraz odstępstwa własności rzeczywistego sygnału użytecznego od

spodziewanej szerokości pasma poza zespołem QRS w przypadku nietypowych lub zniekształconych zapisów.

W rezultacie testu numerycznego z użyciem syntetycznego sygnału szumu białego stwierdzono niewielkie odstępstwa stabilności parametrów modelu od spodziewanych wartości. W przypadku użycia szumu białego i idealnej zgodności rzeczywistej i oczekiwanej płaszczyzny czasowo-częstotliwościowej ewolucji serca wariancja parametrów modelu powinna być zerowa.

Przetestowanie dynamicznych własności modelu, a więc ocena prawidłowości reakcji na skokowo zmienny odstęp sygnału od szumu wymaga studiów własności rzeczywistych źródeł zakłóceń i sporządzenia zestawu szumowych sygnałów testowych reprezentujących spotykane w praktyce własności dynamiczne szumów. Studia te są obecnie prowadzone w Laboratorium Biocybernetyki AGH, a ich dodatkowym uzasadnieniem jest nadzieja na opracowanie efektywnej metody odszumiania elektrokardiogramów w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej poparta uzyskaniem zadowalających rezultatów eliminacji szumu o charakterze stacjonarnym.

Bibliografia

- [1] A. Moss, S. Stern "Noninvasive Electrocardiology – clinical aspects of Holter monitoring" Saunders Co. London, 1996
- [2] P. Augustyniak, R. Tadeusiewicz "The Bandwidth Variability Of A Typical Electrocardiogram" w materiałach konferencji European Medical and Biological Engineering Conference EMBEC '99, Wien Austria, 04-07.11.1999
- [3] P. Augustyniak "Pasma chwilowe sygnału elektrokardiograficznego" w materiałach konferencji Techniki Informatyczne w Medycynie, Ustroń-Jaszowiec 17-19.11.1999
- [4] I. Daubechies "Ten lectures on wavelets," CBMS-NSF conference series in applied mathematics. SIAM Ed, 1992,