

7. *Krivosnogov L.Yu., Egorov M.S. Podavlenie vysokochastotnykh pomekh v elektrokardio-signalakh na osnove usechennoy empiricheskoy modovoy dekompozitsii* [The suppression of high-frequency interference in electrocardiograph based on truncated empirical mode decomposition], *Materialy IV Mezhhreg. nauchn. konf. «Aktual'nye problemy meditsinskoj nauki i obrazovaniya»: elektronnoe nauchn. izdanie* [Materials of the IV all-Russian scientific conference "Actual problems of medical science and education: electronic scientific edition], 2013, pp. 485-491.
8. *Akimov P.S., Bakut P.A., Bogdanovich V.A. i dr. Teoriya obnaruzheniya signalov* [The theory of detection signals]. Moscow: Radio i svyaz', 1984, 440 p.
9. *Krivosnogov L.Yu. Metody i algoritmy pomekhoustoychivoy obrabotki elektrokardiograficheskoy informatsii: Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Methods and algorithms for error-correcting processing electrocardiographic information: cand. of eng. sc. diss]. Penza, 2003.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Т.В. Истомина.

Кривоногов Леонид Юрьевич – Пензенский государственный университет; e-mail: leonidkrivosnogov@yandex.ru; 440067, г. Пенза, ул. Клары Цеткин, 39-53; тел.: 89063960585; к.т.н.; доцент.

Krivosnogov Leonid Yurievich – Penza State University; e-mail: leonidkrivosnogov@yandex.ru; 39-53, Klara Tzetkin street, Penza, 440067, Russia; phone: +79063960585; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 615.47:617-089

А.В. Лучинин, И.Б. Старченко, А.А. Резниченко

АНАЛИЗ И ВЫЯВЛЕНИЕ МЕДЛЕННО-ВОЛНОВЫХ КОМПОНЕНТ ФОТОПЛЕТИЗМОГРАММЫ И ПОСТРОЕНИЕ ФУНКЦИИ РЕГРЕССИИ

Предложен новый метод прогноза биоритмологических характеристик человека, основанный на выделении противофазных компонент спектра сигналов и построении функции регрессии отдельно для каждой из них. Выявлено, что ритмозадающие компоненты спектра модулируются медленно-волновыми компонентами по типу амплитудной модуляции с подавленной несущей. Приведены оценки точности аппроксимации с помощью «прямой» регрессии высокочастотных противофазных компонент и с помощью регрессии огибающей высокочастотного сигнала с последующим восстановлением несущей. Для реализации метода используются стандартные методы цифровой обработки сигналов (спектральный анализ, цифровая фильтрация, метод «синхронного детектирования»). Основные результаты получены на примере выделения медленно-волновой (околоминутной) компоненты фотоплетизмограммы, но может быть применен и для других электрофизиологических сигналов (ЭЭГ, ЭКГ, ЭМГ и др.). Получена возможность реконструкции сигнала на большой интервал времени, что позволяет спрогнозировать фон, относительно которого можно оценить эффективность того или иного физиотерапевтического воздействия.

Фотоплетизмограмма; медленно-волновые компоненты; регрессия.

A.V. Luchinin, I.B. Starchenko, A.A. Reznichenko

ANALYSIS AND IDENTIFICATION SLOW AND WAVE COMPONENT PHOTOPLETHYSMOGRAM AND CREATION OF FUNCTION OF REGRESSION

The new method of the forecast the biorhythmological characteristics of the person is introduced, based on allocation antiphase component of signals range and structure regression function separately for each of them. It is revealed that set rhythm components of a range are modulated by slow-wave components by amplitude modulation type with suppressed carrier. Accuracy

appraisal of approximation with the aid the "direct" high antiphase component regression and the regression enveloping high-frequency signal with the subsequent restoration bearing are given. The standard methods of digital processing signals (the spectral analysis, a digital filtration, a method of «synchronous detecting») are used for a method realization. The main results are received by example of allocation slow-wave (about the minute) components photoplethysmogram, but it can be applied and to other electrophysiological signals (EEG, an electrocardiogram, EMG, etc.). The opportunity signal reconstruction on a big interval of time that allows to predict a background concerning which it is possible to estimate efficiency of this or that physiotherapeutic influence.

Photoplethysmogram; slow-wave components; regression.

В последние годы спектральный анализ смог идентифицировать различные гармонические циклы в широком диапазоне геологических, биологических, климатических, и солнечных процессов. Их общие черты в периодичности прослеживались еще из предыдущих наблюдений, однако последние исследования временных рядов из полученных в недавнее время данных приводят к открытию все новых закономерностей [1, 2].

Одним из таких примеров могут служить теоретические рекурсивные циклы – гармонический набор циклов, которые принимают вид аналогичный волне, задающей собственный периода [2]. Этот собственный период задает для процесса два отличных набора рекурсивных циклов – «полный цикл», связанных с утроением периода и вторичный полуцикл с половинным периодом относительно полного цикла [3, 4].

Эти закономерности целесообразно применить к анализу биоритмов человека и выявлению их иерархии. Известно, что хронодиагностика по ритмам сердечных сокращений отражает не только особенности работы сердца, но и состояние всего организма [10]. При суточном мониторинговании ЭКГ по методу Холтера используют различные алгоритмы хронодиагностики, включая суточные графики частоты сердечных сокращений, отношение низких и высоких частот и гистограммы R-R интервалов [5], функцию Лоренца (скатерограммы) и многие другие [6]. В последние годы кардиологии пришли к выводу, что наиболее информативным показателем для оценки и прогнозирования течения заболеваний сердца и, следовательно, оценки и выбора оптимального лечения, является, например, величина дисперсии R-R интервалов, измеренная не за 5 минут, как это делали раньше, а за несколько часов (суток). Известно также, что изменения вегетативного статуса по показателям ВРС можно зафиксировать не только при сравнении дневного и ночного времени, но даже между различными фазами сна, чередование которых соответствует периодам окологосового ритма. Отношение низких частот к высоким (LF/HF) при сне снижается по сравнению с бодрствованием и при повышении этого отношения инициируется REM стадия сна. Быстрые колебания с окологосовыми периодами LF/HF обнаружены не только в ночное, но и в дневное время суток [8].

Анализ электрофизиологических сигналов имеет определенные отличия от анализа сигналов, например, в сейсмической разведке или в гидролокации. При анализе сигналов техногенного характера или отклика физических систем (механических, электромеханических) численные значения параметров сигнала (амплитуда, частота, спектр, автокорреляционная функция) практически всегда связаны с характеристиками исследуемых систем. При анализе электрофизиологических сигналов принято считать, что такой модели практически никогда не бывает. Зачастую при анализе электрофизиологических сигналов врач-эксперт анализирует кривые, больше опираясь на критерии подобия и ранее встречавшиеся прецеденты, чем на физику процессов, происходящих в мозге [7]. Так, для выявления медленно-волновых компонент по суточной записи R-R сначала проводят выделение фрагментов записи для анализа. Как правило в спектре сигнала медленно-

волновых компоненты не всегда явно выражены или занимают широкую полосу частот по типу амплитудно-модулированных колебаний. Другими словами возникает проблема поиска «резонансной» длины анализируемого цикла.

Целью данной работы является разработка подходов к выявлению состава медленно-волновых составляющих данных, полученных в результате мониторинга электрофизиологических показателей, что дает возможность прогнозирования динамики развития тех или процессов в различных поддиапазонах частот. При анализе были использованы данные измерений фотоплетизмограммы с помощью специально разработанного фотоплетизмографа, позволяющего регистрировать сверхнизкие частотные составляющие. Анализ проводился по первой половине экспериментальных данных, строилась функция регрессии и результаты сравнивались с данными второй половины диапазона.

Выявлена необходимость точной настройки, т.е. выбора «резонансной» длины анализируемого участка, который обеспечивается на основе анализа динамики противофазных компонент спектра сигнала. Выявлено также, что модуляция МВ компонент спектра осуществляется по типу двухполосной модуляции с подавленной несущей. Поэтому выделение модулирующих сигналов и их дальнейшая реконструкция осуществляются с помощью метода синхронного детектирования. Для сравнения приведена реконструкция сигнала с помощью выделения противофазных компонент сигнала в исследуемом диапазоне частот по методике, предложенной в [9].

Ниже приведен пример реконструкции сигналов по экспериментально снятым сигналам фотоплетизмограммы (в спокойном состоянии бодрствования без нагрузки) методом прямого выделения противофазных компонент. На рис. 1 приведены сигналы s_1 и s_2 разной длительности ($t_1, t_2=2t_1$), а на рис. 2 их спектры.

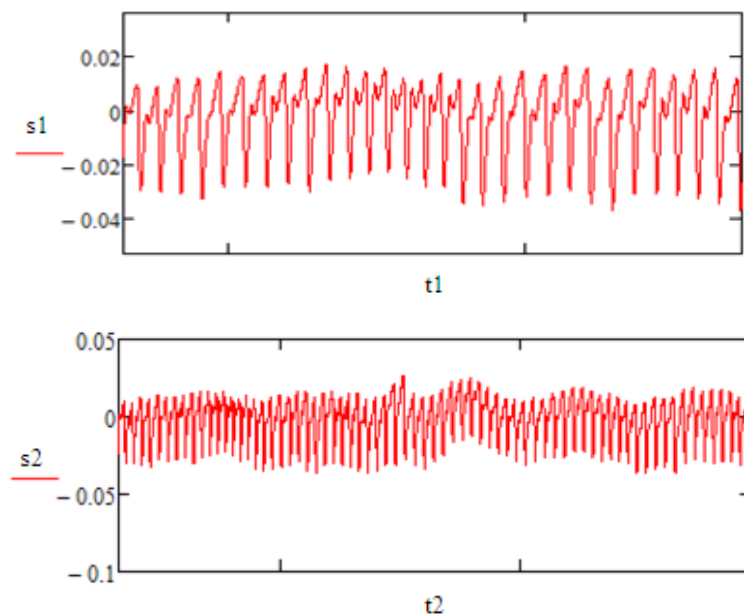


Рис. 1. Сигнал фотоплетизмограммы

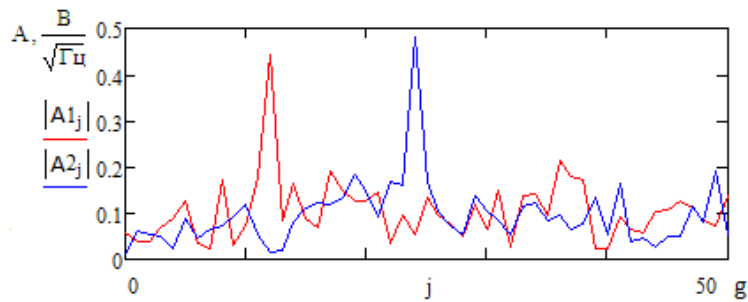


Рис. 2. Амплитудный спектр фотоплетизмограммы $s1$ и $s2$ (g – номер гармоники, A – амплитуда)

Если настройка на «резонансную» длину была проведена не верно, то полученный спектр будет иметь вид аналогичный представленному на рис. 3. При работе с ним точность прогноза значительно меньше.

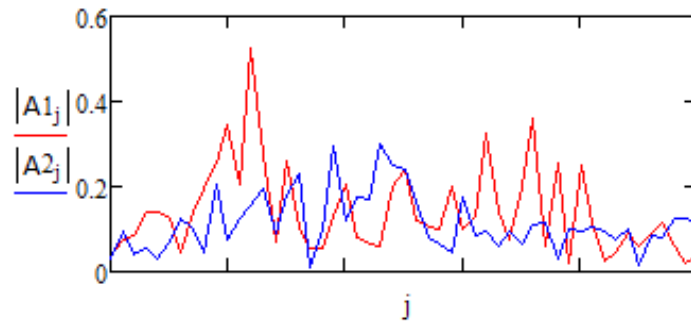


Рис. 3. Амплитудный спектр $s1$ и $s2$ «нерезонансной» длины

При построении прогностической картины (аппроксимации второй половины сигнала $s2$ непосредственно из данных, полученных при разложении сигнала $s1$, который в два раза короче $s2$, получаем следующую картину (рис. 4).

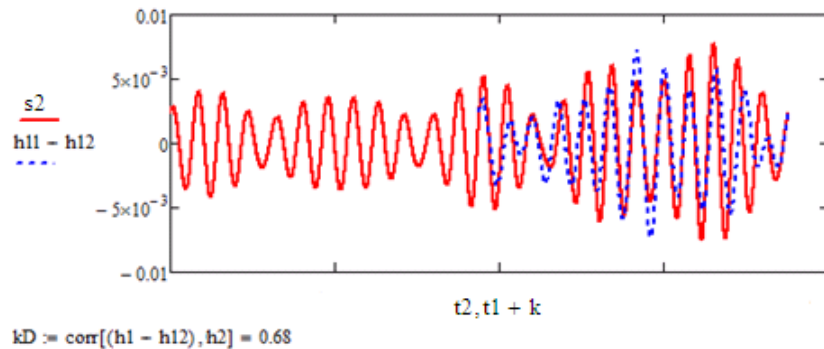


Рис. 4. Реконструированный сигнал в сравнении с исходным ($h11$ и $h12$ -противофазные компоненты $s1$, $h2$ -вторая половина сигнала $s2$)

Коэффициент корреляции (kD) экспериментального сигнала с функцией регрессии равен примерно 0.7.

Для уточнения прогноза и получения более точной картины был проведен дополнительный анализ данных методом синхронного детектирования. Вначале были выделены спектральные составляющие $s1$ и $s2$ для соответствующих анализируемых частотных полос спектра. Из полученных данных была выделена МВ компонента ($s0$), представляющая собой огибающую ритмозадающего колебания с средним периодом порядка 50с (рис. 5). После регрессии огибающей ($s02$) и восстановления «несущей» получаем результат: $s2p$ (рис. 6).

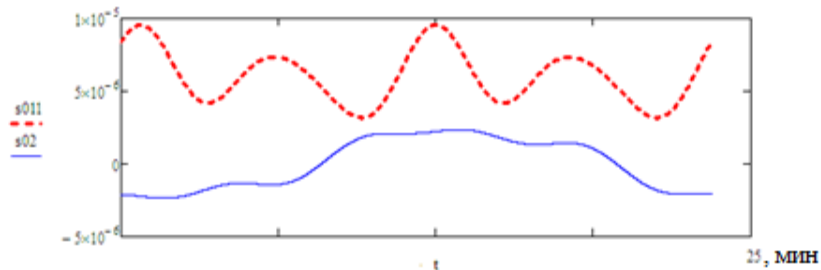


Рис. 5. Составляющие огибающей сигнала $s1$

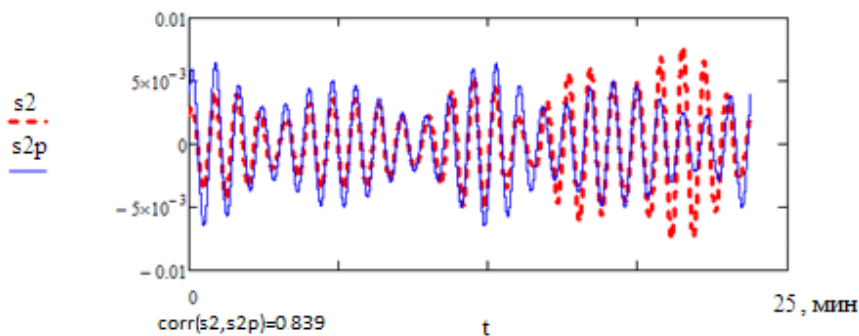


Рис. 6. Исходный ($s2$) и реконструированный ($s2p$) сигналы

Из полученных данных видно, что второй метод обработки дает более точную картину. Кроме того этот метод позволяет строить функции регрессии для других частотных диапазонов сигнала.

Возможность реконструкции сигнала на большой интервал времени (порядка анализируемого периода) позволяет спрогнозировать «фон», относительно которого можно оценить эффективность того или иного физиотерапевтического воздействия, проведенного в конце анализируемого периода. При использовании медицинских приборов с биоуправлением «дальность» прогноза может быть снижена (до порядка $1/8$ анализируемого периода с повышением коэффициента корреляции до 0,7–0,9. При наличии спрогнозированной динамики наблюдаемых параметров можно по их тренду определить начало ситуации с аномальными данными и оценить уровень отклонения от нормы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ding G, Kang J, Liu Q, Shi T, Pei G, Li Y. Insights into the coupling of duplication events and macroevolution from an age profile of animal transmembrane gene families. PLoS Comput Biol 2006; 2(8):e102.

2. *Stephen J. Puetz, Andreas Prokoph, Glenn Borchardt d, Edward W. Mason.* Evidence of synchronous, decadal to billion year cycles in geological, genetic, and astronomical events. *Non-linear Science, and Nonequilibrium and Complex Phenomena.* 31 January 2014.
3. *Longuet-Higgins MS, Drazen DA.* On steep gravity waves meeting a vertical wall: a triple instability // *J Fluid Mech.* – 2002. – 466 с.
4. *Jiang L, Perlin M, Schultz WW.* Period tripling and energy dissipation of breaking standing waves // *J Fluid Mech.* – 1998; 369:273–99.
5. *Баевский Р.М., Кириллов О.И., Клецкин С.З.* Математический анализ изменений сердечного ритма при стрессе. – М.: Наука, 1984. – 222 с.
6. *Загускин С.Л.* Ритмы клетки и здоровье человека. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2010. – 292 с.
7. *Синютин С.А.* Технология структурного анализа электрофизиологических сигналов с использованием вейвлет-преобразования // Программные продукты и системы. – 2002. – № 1. – С. 45-48.
8. *Загускин С.Л.* Аппаратура и методы хронодиагностики и биоуправляемой хронофизиотерапии // Паллиативная медицина и реабилитация. – 1998. – № 4-5. – С. 1213.
9. *Дорогобед Л.А., Лучинин А.В.* Алгоритм определения функциональной асимметрии мозга по реконструированным сигналам ЭЭГ // II Всероссийская научная школа «Нейробиология и новые подходы к искусственному интеллекту и науке о мозге». – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2011. – С. 152-156.
10. *Хильдебрандт Г., Мозер М., Лехофер М.* Хронобиология и хрономедицина. Биологические ритмы медицинское применение. – М., 2006. – 144 с.

REFERENCES

1. *Ding G, Kang J, Liu Q, Shi T, Pei G, Li Y.* Insights into the coupling of duplication events and macroevolution from an age profile of animal transmembrane gene families. *PLoS Comput Biol* 2006; 2(8):e102.
2. *Stephen J. Puetz, Andreas Prokoph, Glenn Borchardt d, Edward W. Mason.* Evidence of synchronous, decadal to billion year cycles in geological, genetic, and astronomical events. *Non-linear Science, and Nonequilibrium and Complex Phenomena.* 31 January 2014.
3. *Longuet-Higgins MS, Drazen DA.* On steep gravity waves meeting a vertical wall: a triple instability, *J Fluid Mech*, 2002, 466 p.
4. *Jiang L, Perlin M, Schultz WW.* Period tripling and energy dissipation of breaking standing waves, *J Fluid Mech*, 1998; 369:273–99.
5. *Baevskiy R.M., Kirillov O.I., Kletskin S.Z.* Matematicheskiy analiz izmeneniy serdechnogo ritma pri stresse [Mathematical analysis of changes in cardiac rhythm during stress]. Moscow: Nauka, 1984, 222 p.
6. *Zaguskin S.L.* Ritmy kletki i zdorov'e cheloveka [Rhythms cells and human health]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2010, 292 p.
7. *Sinyutin S.A.* Tekhnologiya strukturnogo analiza elektrofiziologicheskikh signalov s ispol'zovaniem veyvlet-preobrazovaniya [Technology structural analysis of electrophysiological signals using wavelet transform], *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems], 2002, No. 1, pp. 45-48.
8. *Zaguskin S.L.* Apparatura i metody khronodiagnostiki i bioupravlyaemoy khronofizioterapii [Apparatus and methods frontierlike and as hronofizioterapii], *Palliativnaya meditsina i reabilitatsiya* [Palliative medicine and rehabilitation], 1998, No. 4-5. pp. 1213.
9. *Dorogobed L.A., Luchinin A.V.* Algoritm opredeleniya funktsional'noy asimmetrii mozga po rekonstruirovannym signalam EEG [The algorithm for determining the functional asymmetry of the brain in the reconstructed EEG signals], *II Vserossiyskaya nauchnaya shkola «Neyrobiologiya i novye podkhody k iskusstvennomu intellektu i nauke o mozge»* [II all-Russian scientific school "Neurobiology and new approaches to artificial intelligence and brain science"]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2011, pp. 152-156.
10. *Khil'debrandt G., Mozer M., Lekhofer M.* Khronobiologiya i khronomeditsina. Biologicheskie ritmy meditsinskoe primeneniye [Chronobiology and the bases of bioenergetics. Biological rhythms medical use]. Moscow, 2006, 144 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор Г.В. Куповых.

Лучинин Алексей Витальевич – Южный федеральный университет; e-mail: luchinin46@yandex.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 89198745447; к.т.н.; доцент.

Старченко Ирина Борисовна – e-mail: star@fep.tti.sfedu.ru; тел.: 89185068497; кафедра ЭГА и МТ; д.т.н.; профессор.

Резниченко Александр Анатольевич – e-mail: naos_88@mail.ru; тел.: 89518221278; аспирант.

Luchinin Alexey Vital'evich – Southern Federal University; e-mail: luchinin46@yandex.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79198745447; cand. of eng. sc.; associate professor.

Starchenko Irina Borisovna – e-mail: star@fep.tti.sfedu.ru; phone: +79185068497; the department of EHA&MT; dr. of eng. sc.; professor.

Reznichenko Alexander Anatolievich – e-mail: naos_88@mail.ru; phone: +79518221278; post-graduate student.

УДК 616.172.4, 53.082.7

В.Г. Полосин

СПОСОБ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Рассматривается возможность повышения эффективности автоматического анализа электрокардиографической информации, основанная на применении современных статистических методов анализа информации, содержащейся в выборке результатов измерений. В частности, показана взаимосвязь кинетики изменения результатов ЭКГ и формы распределения выборки случайных величин, полученных за один период сокращения сердца. Предложен способ анализа кардиографической информации, основанный на оценке центральных моментов высокого порядка для статистического распределения результатов, полученных в течение одного периода сердечного сокращения. Рассмотрены особенности поведения формы распределений, построенных на временных интервалах электрокардиосигнала. Результаты оценки формы распределений позволяют поддержать принятие обоснованного решения при установлении диагноза заболевания. Разработан способ оценки справедливости центральных моментов высокого порядка для статистического распределения, базирующийся на вычислении оценок качественного соответствия сортированной выборки результатов ЭКГ и аппроксимирующего разложения по степеням. Разработана методика разложения монотонной изменяющейся функции в степенной ряд, основанная на получении коэффициентов ряда с помощью центральных моментов n -го порядка, вычисленных по случайной выборке данных. Даны примеры аппроксимации сортированных рядов для типичного электрокардиосигнала и для известных симметричного и несимметричного распределений.

Электрокардиосигнал; центральный момент n -го порядка; сортированный ряд; статистическое распределение.

V.G. Polosin

WAY OF THE STATISTICAL ANALYSIS OF ELECTROCARDIOGRAPHIC INFORMATION

The possibility of increasing the efficiency of the automatic electrocardiographic information analysis, based on the using modern statistical methods of the information analysis containing in the selection results of measurements is considered. In particular, the interrelationship of kinetics changes ECG results and the distribution shape of the sample random variables ob-