

Проблема подавления помех при медицинском мониторинге состоит в том, что в условиях нестационарности полезных сигналов и помех их частотные спектры часто пересекаются. Таким образом, искажения БС, вызванные помехами и/или полученные в результате неадекватного помехоподавления, могут привести к ошибочным диагностическим заключениям.

В настоящее время разработано большое количество различных методов и алгоритмов подавления помех в БС [1], [13], причем эта процедура стала многоэтапной: первичное помехоподавление производится на этапе съема (отведения) сигналов интеллектуальными датчиками; затем оно продолжается в биоусилителях с интегрированным полосовым фильтром и встроенной схемой подавления синфазной составляющей помехи; позже, на этапе аналого-цифрового преобразования (АЦП), в современных микросхемах происходит процесс сигма-дельта модуляции, что также обеспечивает фильтрацию определенных составляющих помех, и наконец, на последнем этапе обработки, используется множество алгоритмов цифровой фильтрации БС.

Однако основная проблема состоит в сложности создания алгоритмов, обеспечивающих максимальное подавление помех при минимальном искажении полезного сигнала, поэтому и необходимы комплексный подход и индивидуальная подстройка для каждого БС и конкретного обследуемого.

Предлагается детерминированный подход, обеспечивающий снижение уровня помех различного типа на основе адекватного подбора системы финитных функций (вейвлетов), позволяющий, базируясь на знаниях об информативных структурах конкретных сигналов, эффективно подавлять помехи, по своим спектральным характеристикам пересекающиеся с конкретными БС. На основе данного подхода разработана многоканальная многоцелевая интеллектуальная система мониторинга БС, обобщенная структура которой представлена на *рис. 1*.

Предлагаемая система содержит информационно-алгоритмическую среду, включающую в себя блок интеллектуального анализа БС, блок интеллектуального управления, базу данных, базу решающих правил, основанных на вейвлет-преобразовании БС, а также интерфейс пользователя и веб-приложение.

Многопараметрическая БОС по основным параметрам функциональных систем организма (опорно-двигательной, сердечно-сосудистой, дыхательной и нервной) с применением различного периферического оборудования позволяет всесторонне оценивать и контролировать состояние функциональных систем организма в ходе тренировок. Авторами также ведется разработка интеллектуальных методик проведения сочетанных БОС-тренингов с использованием очков виртуальной реальности, комплекса «Колибри», стабиллоплатформы и миостимуляторов в различных режимах работы [11], [12].

Специально созданная и пополняемая база данных мониторинга позволяет создавать и совершенствовать систему электрофизиологических показателей и комплексных коэффициентов для использования в рамках методик БОС-тре-

нингов [11], а также предлагать и апробировать формулы расчета комплексных коэффициентов для интегрирования и обработки данных биообъекта (БО), на основе которых формируется система решающих правил анализа БС и рекомендации в зависимости от вида нарушений [12], с учетом индивидуальных особенностей обследуемых лиц.

При анализе различных БС в основном применяется непрерывное вейвлет-преобразование [14]-[16], которое вследствие больших вычислительных затрат неприменимо для помехоподавления в системах удаленного мониторинга БМД.

Для снижения влияния НЧ, ВЧ и импульсных помех, перекрывающихся по спектрам с БС, целесообразно применять вейвлет-преобразование [17].

Вейвлетный анализ [18] представляет собой особый тип линейного преобразования сигналов в базисе собственных функций, позволяющего выявлять локальные свойства БС, не обнаруживаемые при помощи традиционных преобразований Фурье и Лапласа. Вейвлеты имеют вид коротких волновых пакетов с нулевым интегральным значением, локализованных по оси аргументов, инвариантных к сдвигу и линейных к сжатию/растяжению. По частотно-временному представлению вейвлеты занимают промежуточное положение между гармоническими функциями, локализованными по частоте, и функцией Дирака, локализованной во времени [19].

Непрерывное вейвлет-преобразование сигнала $S(t)$ описывается выражением

$$W_s(a, b) = [S(t), \psi_{ab}(t)] = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (1)$$

где b – сдвиг по времени; $\psi(t)$ – материнский вейвлет; a – масштаб [20].

Результатом непрерывного вейвлет-анализа функции $S(t)$ является функция $W_s(a, b)$, которая зависит уже и от времени, и от частоты.

Для сокращения вычислительных затрат было выбрано дискретное вейвлет-преобразование, описываемое выражением

$$a = 2^m; \quad b = k \cdot 2^m; \\ \Psi_{mk}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \psi(2^{-m}t - k), \quad (2)$$

где m и k – целые числа.

Плоскость a, b при этом обращается в диадную сетку m, k ; параметр m часто называют параметром масштаба.

Дискретное вейвлет-преобразование возвращает вектор данных той же длины, что и входной, и поэтому оно удобно для обработки и сжатия БС [17].

Результаты

Исследование возможностей повышения помехоустойчивости обработки БС на основе вейвлет-преобразования произ-

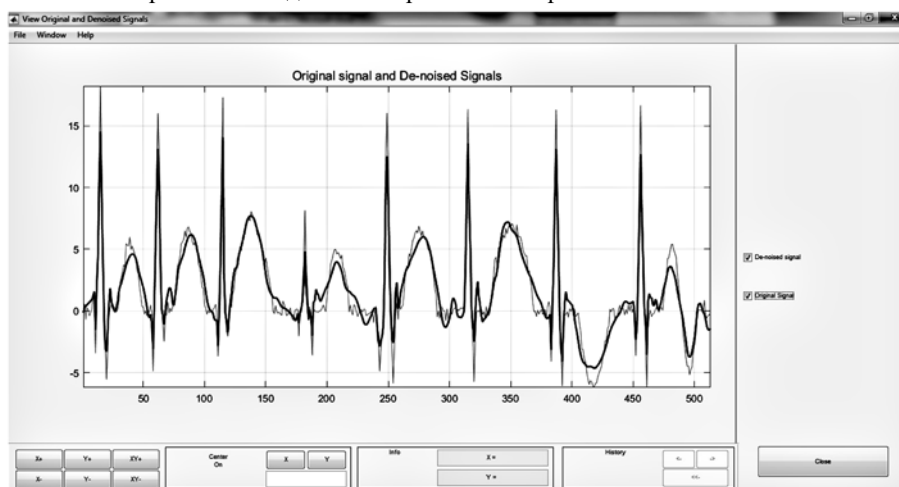


Рис. 2. Вейвлет-разложение ЭКС (вейвлет: db; порядок: 4; уровень: 4)

водилось в пакете MATLAB с применением инструментария WaveMenu, который имеет широкий спектр вейвлет-функций и их пакетов, а также удобный пользовательский интерфейс.

Дискретизированные БС загружались из банков медицинских сигналов, размещенных на ресурсе Physionet.org, который предоставляет в открытом доступе данные в формате, совместимом с MATLAB. Например, большое количество записей электрокардиосигналов (ЭКС) с помехами различного вида, аритмиями и блокадами, размещены в аннотированной базе данных MIT-BIH Arrhythmia, что позволяет проводить тестирование разрабатываемых алгоритмов и решающих правил помехоустойчивого обнаружения информативных структур ЭКС.

Рассмотрим процесс подбора вейвлетов и построение решающего правила обнаружения информативных структур БС на примере фильтрации помех со спектром, перекрывающимся с ЭКС. На рис. 2 представлены результаты подавления сетевой помехи в базе Daubechies [20], при этом видно, что форма информативных импульсов ЭКС практически не меняется.

Подбирая опытным путем пороговые коэффициенты для каждого уровня разложения, удалось составить систему вейвлет-коэффициентов для обнаружения QRS-комплексов ЭКС при различных помехах.

По результатам исследований было разработано решающее правило (РП), которое обеспечивает обнаружение QRS-комплексов на основе сравнения с порогом коэффициентов d_1 , d_2 и d_3 :

$$РП = \begin{cases} 1, & \text{if } 4 \leq d_3 < 8 \wedge 1 \leq d_2 \leq 4 \wedge 1 \leq d_1 \leq 2; \\ 0, & \text{else,} \end{cases} \quad (3)$$

где d_1 – значение коэффициента первого уровня; d_2 – значение коэффициента второго уровня; d_3 – значение коэффициента третьего уровня.

При этом коэффициент d_1 снижает сетевую помеху. Остальные два коэффициента настроены на выделение фронтов самого сигнала (рис. 3).

Низкочастотную составляющую целесообразно подавлять, подбирая пороговое значение по графику компонент сигналов, восстановленных по их коэффициентам a_4 .

В окне пороговых коэффициентов видно, как выделяются все восемь QRS-комплексов. Таким образом, РП позволяет одновременно осуществлять нахождение QRS-комплексов ЭКС и снизить помеховые составляющие.

Объем статьи не позволяет представить все результаты, однако тестирование РП на большом объеме ЭКС с помехами различного вида показало, что информативные импульсы обнаруживаются в 99 % случаев.

Заключение

Достигнуто повышение помехоустойчивости в канале системы БОС-мониторинга на основе применения дискретного вейвлет-преобразования в дискретном базисе. Представлено решающее правило обнаружения информативных структур, и приведены результаты его тестирования на примере вейвлет-анализа ЭКС. В результате моделирования в пакете MATLAB показана эффективность дискретного вейвлет-преобразования в базисе Daubechies для снижения влияния помех, перекрывающихся со спектром ЭКС. В настоящее время проводятся исследования по разработке РП вейвлет-анализа сигналов ЭЭГ и ЭМГ, входящих в систему БОС-мониторинга лиц с инвалидностью. В целом применение предложенного детерминированного подхода к подавлению помех сложного вида в основных БС при создании беспроводных интеллектуальных систем для БОС-мониторинга БМД позволит в перспективе повысить эффективность диагностики и реабилитации для целого ряда задач.

Список литературы:

1. Zywiets C., Celikag D. Testing results and derivation of minimum performance criteria for computerized ECG-analysis. – In: Computers in Cardiology. IEEE Computer Society Press, Venecia, 1992. 202 с.
2. Witte M., Kober S.E., Ninaus M., Neuper C., Wood G. Control beliefs can predict the ability to up-regulate sensorimotor rhythm during neurofeedback training // Front. Hum. Neurosci. 2013. Vol. 7.
3. Budzynski T.H., Budzynski H.K., Evans J.R., Abarbanel A. Introduction to quantitative EEG and neurofeedback: Advanced theory and applications. – N.Y.: Academic Press, 2009. 549 p.
4. Пинчук Д.Ю. Биологическая обратная связь по электромиограмме в неврологии и ортопедии: справочное руководство / Д.Ю. Пинчук, М.Г. Дудин. – СПб.: Человек, 2002. 120 с.
5. Официальный сайт компании «Mindmed» / <https://www.mindmed.co/> (дата обращения: 01.08.2020).
6. Ji Won Yoo, Dong Ryul Lee, Yon Ju Sim et al. Effects of innovative virtual reality game and EMG biofeedback on innovator control in cerebral palsy // Bio-Medical Materials and Engineering. 2014. Vol. 24. PP. 3613-3618.
7. The Future of Therapy – VR and Biosensors / <https://imotions.com/blog/vr-therapy/> (дата обращения 27.07.2020 г.).

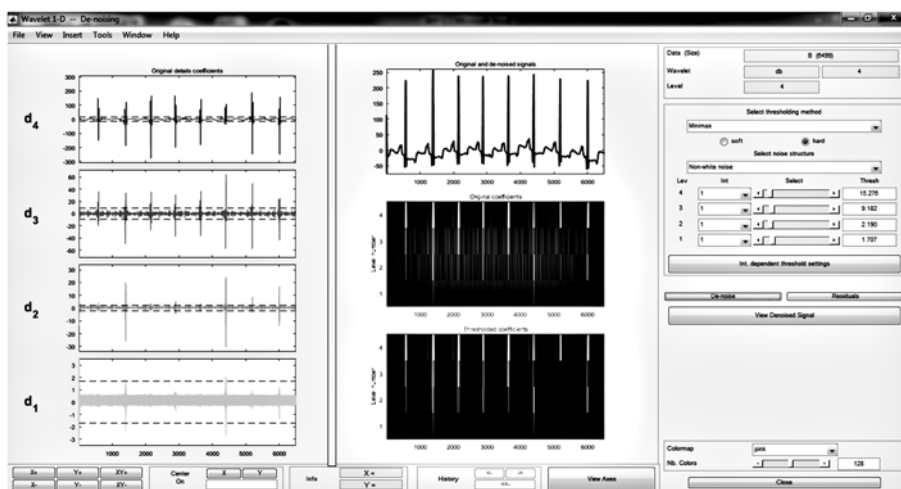


Рис. 3. Пример одновременного подавления шума в ЭКС и обнаружения кардиоимпульсов путем подбора пороговых значений d_i с применением РП

8. Virtual Reality in Psychology: Therapy and Research / <https://medium.com/sciforce/virtual-reality-in-psychology-therapy-and-research-525bd9e4283a> (дата обращения 27.07.2020 г.).
9. *Rahman Y.A., Hoque M.M., Zinnah K.I., Bokhary I.M.* Helping-hand: A data glove technology for rehabilitation of monoplegia patients / In: 9th International Forum on Strategic Technology (IFOST). IEEE. 2014. PP. 199-204.
10. Официальный сайт Центра цифровых реабилитационных технологий «Степс Реабил» / <http://stepsreabil.com/> (дата обращения 27.07.2020 г.).
11. *Nikolsky A.E., Petrunina E.V., Istomina T.V.* Modern methods and means of rehabilitation and social adaptation (physical and rehabilitation medicine) / LAMBERT Academic Publishing, 2019.
12. *Istomina T.V., Filatov I.A., Safronov A.I., Istomin V.V. et al.* Multi-channel biopotential network analyzer for remote rehabilitation of patients with postural deficiencies // Biomed. Eng. 2014. Vol. 48. № 3. PP. 120-125.
13. Помехи при регистрации электрокардиограммы и методы их устранения. Электронное учебное пособие / <https://cyberpedia.su/14x7399.html> (дата обращения 27.07.2020 г.).
14. *Дубровин В.И., Твердохлеб Ю.В.* Усовершенствование методов анализа ЭКГ-сигналов на основе вейвлет-преобразования в системе электрокардиографии высокого разрешения // Радиотехника и информатика. 2011. № 1 (24).
15. *Подкур П.Н., Смоленцев Н.К.* Вейвлет-пакетное разложение ЭЭГ на основные частотные ритмы // Вестник ТГУ. Управление, вычислительная техника и информатика. 2016. № 2 (35).
16. *Кузнецов С.Ю. и др.* Вейвлет-анализ поверхностной электромиограммы // Физиология человека. 2011. Т. 37. № 5. С. 129-136.
17. *Истомина Т.В., Чувькин Б.В., Щеголев В.А.* Применение теории wavelets в задачах обработки информации / Монография. – Пенза: ПГУ, 2000. 188 с.
18. *Яковлев А.Н.* Введение в вейвлет-преобразования. – НГТУ, 2003.
19. Вейвлет-преобразование. Глава 4. Обработка и анализ данных. Электронное учебное пособие / <http://gwyddion.net/documentation/user-guide-ru/wavelet-transform.html> (дата обращения 27.07.2020 г.).
20. *Добеши И.* Десять лекций по вейвлетам. – М.: Ижевск: РХД, 2001.

Татьяна Викторовна Истомина,
 д-р техн. наук, профессор,
 кафедра информационных технологий
 и прикладной математики,
 ФГБОУ ИВО «Московский государственный
 гуманитарно-экономический университет»,
 профессор,
 кафедра основ радиотехники,
 НИУ «Московский энергетический институт»,
 Елена Валерьевна Петрунина,
 канд. техн. наук, декан,
 факультет прикладной математики и информатики,
 ФГБОУ ИВО «Московский государственный
 гуманитарно-экономический университет»,
 Виктор Владимирович Истомин,
 канд. техн. наук, доцент,
 кафедра информационных технологий
 и прикладной математики,
 ФГБОУ ИВО «Московский государственный
 гуманитарно-экономический университет»,
 доцент,
 кафедра основ радиотехники,
 НИУ «Московский энергетический институт»,
 Наталья Васильевна Труб,
 ст. преподаватель,
 кафедра информационных технологий
 и прикладной математики,
 ФГБОУ ИВО «Московский государственный
 гуманитарно-экономический университет»,
 Елена Владимировна Копылова,
 доцент,
 кафедра основ радиотехники,
 НИУ «Московский энергетический институт»,
 г. Москва,
 e-mail: istom@mail.ru

Работы коллектива одной из ведущих научных школ РФ «Радиоэлектронные и информационные средства оценки физиологических параметров живых систем» (РЭИС ЖС) во главе с профессором, д.т.н. К.В. Зайченко. Советом по грантам Президента Российской Федерации коллектив научной школы РЭИС ЖС был признан победителем конкурса ведущих научных школ РФ (свидетельство НИШ-3455.2012.8).

Профессор, д.т.н. К.В. Зайченко выступил на международной конференции «ФРЭМЭ'20» с пленарным докладом, в котором были изложены результаты, приведенные в двух статьях, опубликованных в этом номере нашего журнала.

К.В. Зайченко, А.А. Кордюкова, Е.П. Логачев, М.Н. Лучкова

Медицинские аспекты применения радиолокационных методов обработки сигналов при реализации электрокардиографии сверхвысокого разрешения

Аннотация

Применение радиолокационных технологий и методов обработки сигналов позволило реализовать новый высокоэффективный авторский метод исследований биоэлектрической активности сердца – электрокардиографию сверхвысокого разрешения. В процессе его реализации осуществлен синтез оптимальных и подоптимальных алгоритмов и структур обнаружения отдельной компоненты полезного электрокардиосигнала. Это позволило разработать комплекс схмотехнических, алгоритмических и программных средств для выделения и обработки новых ЭКГ-маркеров процесса развития патологий сердечно-сосудистой системы.

Введение

При электрофизиологических исследованиях биоэлектрической активности сердца регистрируемые сигналы $y(t)$ являются слабыми и шумоподобными, однако содержат полезный

электрокардиосигнал (ЭКС), состоящий из отдельных компонент (ОК), в том числе низкоамплитудных и высокочастотных информационно значимых составляющих – микропотенциалов, которые имеют важное диагностическое значение для выявления кардиопатологий. Кроме того, в $y(t)$ имеются шу-