

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-839-845

УДК 681.784.8

Применение методов биорадиофотоники для обработки биоэлектрических сигналов

Кирилл Вадимович Зайченко¹, Борис Симхович Гуревич²✉, Сергей Александрович Рогов³,
Анна Алексеевна Кордюкова⁴, Михаил Сергеевич Кузьмин⁵

^{1,2,4} Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург, 198095, Российская Федерация

^{3,5} Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

¹ kvz235@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2881-4386>

² bgurevich48@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-7520-7087>

³ sarogov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4251-1197>

⁴ annygm00@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6099-4276>

⁵ ranlitik@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6044-2423>

Аннотация

Предмет исследования. В работе рассмотрено применение современных и перспективных методов биорадиофотоники для обработки биоэлектрических сигналов на базе оптических и акустооптических устройств. Основные трудности применения этих методов связаны с тем, что исследуемые сигналы являются низкочастотными, и требуется разработка специальных мер адаптации рассматриваемых устройств для их обработки. **Метод.** Предложено вводить информационный биоэлектрический сигнал в акустооптическую систему обработки с временным интегрированием, используя модуляцию высокочастотной несущей с линейной частотной модуляцией низкочастотным информационным сигналом. Такая система должна обеспечить реализацию операции свертки с помощью ячеек Брэгга, которые ориентированы навстречу друг к другу. Предложенный подход обеспечил возможность вычисления спектра мощности биоэлектрического сигнала и его вейвлет-преобразования, причем наличие несущей с линейной частотной модуляцией обязательно для обоих видов обработки. Впервые использован метод предварительного сжатия биоэлектрического сигнала для его переноса в высокочастотную область. Это позволило вводить низкочастотный информационный сигнал в высокочастотную акустооптическую систему обработки с пространственным интегрированием. В простом акустооптическом корреляторе с опорным транспарантом на выходе фотоприемника сформирована огибающая корреляционной функции. Применен набор опорных транспарантов в многоканальном корреляторе для реализации вейвлет-анализа протяженного биоэлектрического сигнала с использованием материнского вейвлета. Предварительная оптическая обработка исследуемого сигнала осуществлена на жидкокристаллических матрицах. **Основные результаты.** Выполнен анализ обработки электрокардиосигналов, снятых с подопытных животных (крыс) с использованием жидкокристаллической матрицы для ввода этих сигналов в оптическую систему. Показано, что спектральная и вейвлет-обработка могут быть реализованы без использования модуляции высокочастотной несущей низкочастотным информационным сигналом. **Практическая значимость.** Использование полученных результатов позволит создать новое семейство устройств вейвлет-обработки биоэлектрических сигналов, реализуемой в реальном масштабе времени, что внесет важный вклад в совершенствование диагностики заболеваний сердечно-сосудистой системы, головного мозга и центральной нервной системы.

Ключевые слова

биоэлектрические сигналы, оптическая обработка, акустооптические спектроанализаторы, конвольеры и корреляторы, жидкокристаллические матрицы, сжатие информационных сигналов

Благодарности

Работа поддержана Минобрнауки Российской Федерации, госзадание № 075-00761-22-00, тема № FZZM-2022-0011.

Ссылка для цитирования: Зайченко К.В., Гуревич Б.С., Рогов С.А., Кордюкова А.А., Кузьмин М.С. Применение методов биорадиофотоники для обработки биоэлектрических сигналов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 5. С. 839–845. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-839-845

© Зайченко К.В., Гуревич Б.С., Рогов С.А., Кордюкова А.А., Кузьмин М.С., 2022

Application of bioradiophotonics methods for the processing of bioelectric signals

Kirill V. Zaichenko¹, Boris S. Gurevich²✉, Sergey A. Rogov³, Anna A. Kordyukova⁴,
Mikhail S. Kuzmin⁵

^{1,2,4} Institute for Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation,

^{3,5} The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, Saint Petersburg, 193232, Russian Federation

¹ kvz235@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2881-4386>

² bgurevich48@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-7520-7087>

³ sarogov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4251-1197>

⁴ annygm00@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6099-4276>

⁵ ranlitik@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6044-2423>

Abstract

The application of modern and perspective bioradiophotonics methods on the basis of optical and acousto-optic devices for the processing of bioelectric signals (BES) have been considered. The basic application difficulties of these methods are connected with the fact that the studied signals are of low frequencies, and development of special actions are required for the processing devices adapting. It has been proposed to introduce into acousto-optic processing system with time integration the bioelectric signals using method of high frequency carrier with linear frequency modulation which is modulated by low frequency signal. The system configuration has to provide the realization of convolution procedure; hence, the used Bragg cells must be oriented oppositely to each other. The performed analysis has shown that it is possible to realize both signal power spectrum calculation and its wavelet transform; the presence of carrier is obligatory for both kinds of processing. Also, the method of the preliminary BES compression has been proposed for its transmission into the high frequency area. In this case, the possibility occurs to introduce the signal into the acousto-optic processing system with spatial integration. In the simple acousto-optic correlator with the reference transparency the envelope of the correlation function is formed depending on time. Using the set of the reference transparencies in the multichannel correlator, it is possible to realize the prolonged BES wavelet analysis using the mother wavelet. The optical preliminary BES processing can be also performed using liquid crystal arrays. The analysis of the processing of electrocardiac signals obtained from the experimental animals (rats) has been listed using the liquid crystal array for the signal introduction into optical processing system. It has been shown that both spectral and wavelet processing can be realized in this case without using of the high frequency carrier by the low frequency signal. The use of the obtained results will make it possible to create a new family of devices for wavelet processing of bioelectrical signals implemented in real time which will make an important contribution to improving the diagnosis of diseases of the cardiovascular system, the cortex, and the central nervous system.

Keywords

bioelectric signals, optical processing, liquid crystal arrays, acousto-optic spectrum analyzers, convolvers and correlators, liquid crystal arrays, information signals compression

Acknowledgements

The work has been supported by Education and Science Ministry of the Russian Federation, State task No. 075-00761-22-00, project No. FZZM-2022-0011.

For citation: Zaichenko K.V., Gurevich B.S., Rogov S.A., Kordyukova A.A., Kuzmin M.S. Application of bioradiophotonics methods for the processing of bioelectric signals. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 5, pp. 839–845 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-839-845

Введение

Выявление новых диагностически значимых маркеров и признаков различных патологий живых систем — одна из основных задач как для медиков, так и для технических специалистов, разрабатывающих системы извлечения информации из биоэлектрических сигналов (БЭС). В частности обработка БЭС должна обеспечивать надежную диагностику сердечно-сосудистых заболеваний, а также патологий головного мозга и центральной нервной системы. Эта задача может быть решена на основе использования инструментальной электрофизиологии сверхвысокого разрешения (СВР) — нового авторского метода изучения электрической активности клеток, тканей и органов живых систем [1]. Метод основан на извлечении максимально возможного объема полезной информации о состоянии исследуемого объекта и включает в себя две основные

составные части СВР: метод электрокардиографии (ЭКГ), обеспечивающий изучение тонкой структуры электрокардиосигналов (ЭКС) [2], а также метод электроэнцефалографии для детальных исследований электроэнцефалографических сигналов [3]. Одна из главных идей метода инструментальной электрофизиологии СВР и его составных частей заключается в расширении амплитудного и частотного диапазонов съема, регистрации и обработки БЭС СВР за счет применения новейших информационных технологий и самой современной радиоэлектронной элементной базы. Данные методы предложены и разрабатываются одной из ведущих научных школ Российской Федерации (РФ) «Радиоэлектронные и информационные средства оценки физиологических параметров живых систем» (РЭИС ЖС) во главе с профессором, доктором технических наук К.В. Зайченко. Советом по грантам Президента Российской Федерации коллектив научной школы

РЭИС ЖС был признан победителем конкурса ведущих научных школ РФ — Свидетельство НШ-3455.2012.8. В научную школу входят ученые различных научных организаций и университетов РФ, а базой для ее работы является Институт аналитического приборостроения РАН.

К современному и перспективному методам фотоники обработки БЭС, для которых сегодня применяется термин «биорадиофотоника», следует отнести такие методы как оптическую и акустооптическую обработки этих сигналов. Их основные достоинства — простота и малые габариты реализующих устройств, низкое энергопотребление и высокое быстродействие. При обработке низкочастотных (НЧ) сигналов, одни из которых — БЭС, быстродействия цифрового процессора достаточно. Однако в некоторых специфических случаях, как, например, когда необходимо обойтись без электронно-вычислительных машин для уменьшения веса и габаритов устройства спектральной обработки БЭС [4], актуально применение оптических и акустооптических средств. В ранних работах, посвященных оптической обработке НЧ сигналов, предложено использовать устройства ввода в виде записи сигналов на фото пленке или на трубке «Титус» [5]. Также рекомендованы акустооптические устройства с пространственным и временным интегрированием, в которых НЧ сигнал модулирует высокочастотную (ВЧ) несущую [6].

Важнейший источник информации о свойствах сигнала — его вейвлет-преобразование, в том числе реализуемое с помощью оптического процессора. Оно полезно для исследования нестационарности сигнала, определения его специфических особенностей и характерных элементов, а также для поиска их локализации [7]. Основой системы оптической обработки в этом случае обычно является оптический коррелятор, снабженный набором вейвлет-фильтров. Процедуры оптической обработки в таких процессорах обычно предусматривают либо голографическую запись, преимущественно методами динамической голографии [8], либо регистрацию изображения с помощью различных пространственных модуляторов света [9, 10]. Эти виды процессоров обеспечивают получение данных о частотно-временном распределении изучаемого сигнала. Благодаря этому достигается высокоточная локализация неоднородностей и характерных элементов исследуемого сигнала.

Для обеспечения спектральной и вейвлет-обработки БЭС, необходимо добиться возможности разрешения очень низких частот, характерных для БЭС. Как ЭКС, так и электроэнцефалографические сигналы даже для режима СВР имеют полосу частот, расположенную между несколькими герцами и несколькими килогерцами. Это обстоятельство создает дополнительное требование к системе обработки и ряд трудностей, поскольку акустооптические устройства работают с сигналами, частота которых составляет десятки и сотни мегагерц. Следовательно: акустооптический прибор должен осуществлять спектральную и вейвлет-обработку БЭС; частотные диапазоны исследуемых информационных сигналов и акустооптических устройств должны быть согласованы.

Обработка БЭС акустооптическими устройствами с временным интегрированием

Обозначенные задачи могут быть решены с использованием акустооптических процессоров с временным интегрированием. Принцип временного интегрирования для акустооптических устройств спектрального анализа предложен в работах [11, 12]. Схема простейшего спектроанализатора с временным интегрированием показан на рис. 1, где L — полуширина апертуры входного светового пучка, F — фокусное расстояние линз, а $s_{\text{вых}}(t)$ — выходной сигнал, снимаемый с фотодетектора.

Принципы работы данного устройства и конвольвера Монтгомери [13] идентичны. В случае, если предложенная оптическая схема применяется для спектрального анализа БЭС [14], то в ней один из сигналов $s_1(t)$ представляет собой колебание с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), модулированное по амплитуде анализируемым информационным сигналом $s_a(t)$, а другой сигнал $s_2(t)$ — ЛЧМ-колебание с прямоугольной огибающей.

Оптическая схема включает в себя две одинаковые встречно ориентированные ячейки Брэгга. Две линзы обеспечивают оптическое преобразование Фурье по двум координатам, а режекторный фильтр (бленда) вырезает нулевой дифракционный порядок. Многоэлементный линейный фотодетектор обеспечивает накопление заряда и формирует выходной сигнал. Выполненный анализ, на основе рис. 1, показал [14], что если принять время накопления заряда на фотодетекторе равным длительности периода модуляции ЛЧМ-колебания, то накопленные заряды будут пропорциональны спектру мощности анализируемого сигнала. При этом время накопления в современных линейках или матрицах фотодетекторов достигло единиц секунд. Разрешимый частотный интервал для акустооптических процессоров такого типа определяется временем накопления фотоприемника, поэтому он может составить величину порядка десятков-сотен герц. Отметим, что общая разрешающая способность такого устройства не превышает ее значения для акустооптических спектроанализаторов с пространственным интегрированием, поэтому полоса анализируемых частот может оказаться крайне невысокой и всего на 2–3 порядка превышать разрешимый частотный интервал (доли

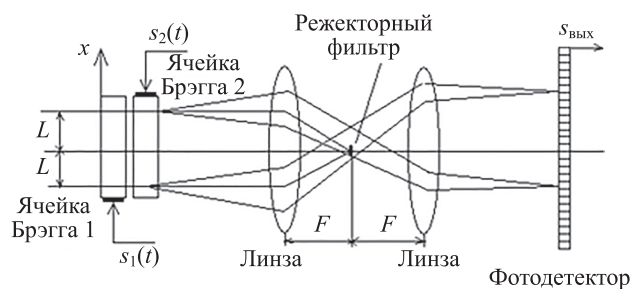


Рис. 1. Оптическая схема акустооптического спектроанализатора с временным интегрированием
 Fig. 1. Optical circuit of acousto-optic spectrum analyzer with time integration

герц — единицы герц). Таких значений может быть достаточно для анализа стандартных БЭС, исследуемых в ЭКГ и электроэнцефалографии.

В схеме конвольвера Монтгомери (рис. 1), согласно [15], на ячейках фотоприемника формируется заряд, который пропорционален энергии падающего света за время засветки и ограничивается допустимым временем интегрирования линейки. Расчет энергии [6] имеет вид:

$$E(x) = \frac{1}{4T} \int \left[\operatorname{Re} \tilde{s}_1^* \left(\frac{x}{v} - t \right) \right]^2 dt + \frac{1}{4T} \int \left[\operatorname{Re} \tilde{s}_2 \left(t + \frac{x}{v} - T_a \right) \right]^2 dt + \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ \int \tilde{s}_1^* \left(\frac{x}{v} - t \right) \tilde{s}_2 \left(t + \frac{x}{v} - T_a \right) dt \right\}, \quad (1)$$

где \tilde{s} — комплексный сигнал; x и v — координата и скорость звука в среде звукопровода вдоль ячеек Брэгга и фотодетектора; t — текущее время; T_a — временная апертура ячейки Брэгга; знак (*) — комплексное сопряжение. Первые два члена правой части уравнения (1) — постоянные величины при достаточно большом времени интегрирования T , а третий член представляет собой свертку функций $s_1(t)$ и $s_2(t)$.

Приведенные выше соображения позволили впервые использовать схему конвольвера с временным интегрированием (конвольвер Монтгомери) для реализации вейвлет-преобразования информационного сигнала $s_1(t)$, состоящего в свертке этого сигнала с его материнским вейвлетом $s_2(t)$ [15].

В конвольвере Монтгомери [13] предусмотрен ввод радиочастотных сигналов $s_1(t)$ в соответствующие две ячейки Брэгга, для формирования их свертки в соответствии с формулой (1). Это дало возможность [15] предложить авторскую реализацию вейвлет-преобразования биоэлектрического сигнала, заключающуюся в амплитудной модуляции двух радиочастотных несущих в ячейках Брэгга (рис. 1) информационным БЭС и его материнским вейвлетом.

В этом случае выходной сигнал акустооптического вейвлет-процессора — конвольвера с временным интегрированием может быть представлен в виде [15]:

$$Q(x) = \operatorname{Re} \left\{ A \exp(i2K_0x) \int_{L/v}^{L/v+T} s_1 \left(t + \frac{x}{v} \right) s_2 \left(\frac{x}{v} - t \right) dt \right\} + C,$$

где $K_0 = \Omega_0/v$, Ω_0 — начальная частота сигнала ЛЧМ-несущей; L — размер линейной апертуры акустооптической ячейки; C — пьедестал с переменной амплитудой.

Следовательно, при использовании несущего радиочастотного ЛЧМ-сигнала накопленный заряд на фотоприемнике (ПЗС-линейке) несет информацию о вейвлет-преобразовании сигнала $s_1(t)$ по материнскому вейвлету $s_2(t)$ с параметром времени накопления T . Таким образом, существует возможность на одном акустооптическом процессоре с временным интегрированием на базе конвольвера Монтгомери при подаче на его входы различных соответствующих сигналов производить вычисление не только спектра мощности информационного БЭС $s_1(t)$, но и его вейвлет-преобразования.

Обработка БЭС акустооптическими устройствами с пространственным интегрированием

Более простыми являются акустооптические корреляторы и анализаторы спектра с пространственным интегрированием. Их недостаток — невозможность обработки сигналов, длительность которых превышает временную апертуру ячейки Брэгга — не более нескольких десятков микросекунд. Эту трудность можно обойти, подавая в систему НЧ сигнал, сжатый во времени [16, 17]. При этом полоса сигнала расширится в число раз, равное коэффициенту сжатия, но, поскольку акустооптические устройства имеют широкую полосу пропускания, это вполне допустимо, даже если сжатым сигналом будет модулироваться ВЧ несущая. Сжатие БЭС можно осуществлять, считывая его из буферного запоминающего устройства со скоростью, большей, чем скорость записи. Например, для поиска фрагмента НЧ сигнала длительностью 10 мс в протяженном сигнале с полосой 2 кГц, можно сжать его в 1000 раз. Тогда длительность фрагмента составит 10 мкс, и он поместится на опорном транспаранте коррелятора с длиной, соответствующей временной апертуре ячейки Брэгга. Полоса сжатого сигнала составит 2 МГц. Аналого-цифровой и цифро-аналоговый преобразователь, а также устройство буферной памяти при таких параметрах сигналов можно легко реализовать. В простом акустооптическом корреляторе с опорным транспарантом на выходе фотоприемника при этом формируется огибающая корреляционной функции. Используя набор опорных транспарантов в многоканальном корреляторе, можно реализовать вейвлет-анализ протяженного БЭС с использованием материнского вейвлета, зависящего от двух параметров [12].

Использование жидкокристаллических матриц для обработки БЭС

В настоящее время одно из перспективных оптических устройств ввода информации в систему обработки — жидкокристаллические (ЖК) матрицы с электронным управлением [18]. Рассмотрим возможности использования таких матриц при вводе БЭС в систему обработки [19]. Число отсчетов в реализации НЧ сигналов ЭКГ СВР зачастую невелико, так как вся информация о сигнале, длительностью 1 с с полосой 2 кГц, содержится в 4000 отсчетов. ЖК матрицы с таким числом пикселей в строке существуют. Используя несколько строк матрицы, можно вводить в оптическую систему несколько сигналов для их параллельной обработки. Для сигналов с большим числом отсчетов (до нескольких миллионов) можно применить их растровый ввод в ЖК матрицу, а более длинные сигналы — обрабатывать отдельными фрагментами. В связи с тем, что время на оптическую обработку и регистрацию сигналов на выходе системы гораздо меньше длительности БЭС, пропуски при вводе сигналов из-за обработки предыдущих фрагментов будут малы. Кроме того, при использовании двух поочередно работающих систем, пропусков в обработке можно полностью избежать.

На основе оптических устройств обработки с вводом сигналов ЖК матрицами можно создать одноканальные и многоканальные анализаторы спектра, корреляторы и конвольверы сигналов с пространственным интегрированием, в том числе и для обработки протяженных сигналов [20, 21]. В этих устройствах не требуется использовать модуляцию ВЧ несущей НЧ сигналом. Таким образом, применение ЖК матриц с электронным управлением упрощает устройство ввода и является перспективным для обработки БЭС в оптических системах.

Первые экспериментальные исследования возможности оптической обработки БЭС проведены авторами настоящей работы на действующем макете фурье-процессора с ЖК матрицей от видеопроектора [22]. Выборка в 1024 отсчета из ЭКС СВР, снятого в Институте экспериментальной медицины Центра В. А. Алмазова с подопытной крысы [4], вводилась в виде пространственного сигнала в строки ЖК матрицы. Длина сигнала соответствовала длине строки матрицы, а ширина занимала несколько рядом расположенных строк с целью увеличения мощности выходного сигнала процессора. Для ввода биполярных сигналов к ЭКС СВР добавлен сигнал подставки (постоянная составляющая). Пример изображения на мониторе вводимого матрицей входного сигнала оптической системы показан на рис. 2. Темное поле соответствует незанятой сигналом части матрицы.

Выходной сигнал в фокальной плоскости фурье-объектива, соответствующий энергетическому спектру суммы ЭКГ сигнала и подставки, зарегистрирован с помощью ВЭБ-камеры и выведен на монитор. Одновременно на втором мониторе можно было зарегистрировать выбранное сечение спектра. На рис. 3 приведены выходной сигнал f оптической системы (энергетический спектр) и его сечение по оси частот для низкочастотной составляющей ЭКС СВР (из НЧ канала). Частоты выше примерно 100 Гц отфильтрованы в ЭКС СВР до подачи сигнала в оптическую систему. В спектре хорошо видны гармоники низкочастотных выбросов ЭКС СВР. Ноль на частотной оси (рис. 3, *a*) совпадает с центром узкого спектра постоянной составляющей, максимум которого ограничен фотопри-

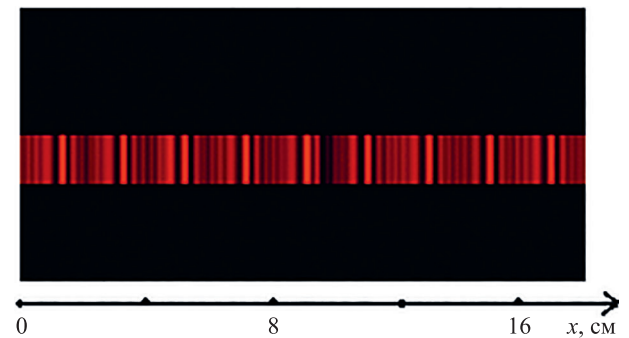


Рис. 2. Наблюдаемое на мониторе изображение входного электрокардиосигнала на подставке из постоянной составляющей, вводимое в оптическую систему жидкокристаллической матрицей; x — координата вдоль изображения

Fig. 2. Input electrocardiac signal image observed in the monitor with the pedestal of the constant component introduced into the optical system by liquid crystal array; x — coordinate along the image

емником. Подчеркнем, что на рис. 2 изображен входной сигнал, соответствующий спектру, показанному на рис. 3, *a*.

На рис. 4 показаны входной и выходной сигналы оптической системы, а также сечение выходного сигнала по оси частот при обработке ВЧ составляющей ЭКС СВР (из ВЧ канала).

Частоты ниже примерно 100 Гц предварительно отфильтрованы в ЭКС СВР. Для удобства регистрации в ВЧ области спектр в данном случае был сжат в два раза по частотной оси. Зная частоту гармоник сигнала в НЧ спектре, можно определить масштаб по частотной оси и границы шумоподобного ВЧ спектра в данной реализации ЭКС СВР.

Сравнение выходных сигналов оптического процессора со спектрами, полученными на электронно-вычислительных машинах, показало их хорошее совпадение, что свидетельствует о перспективности применения оптического фурье-процессора с ЖК матрицей на входе для решения задач обработки биоэлектрических сигналов.

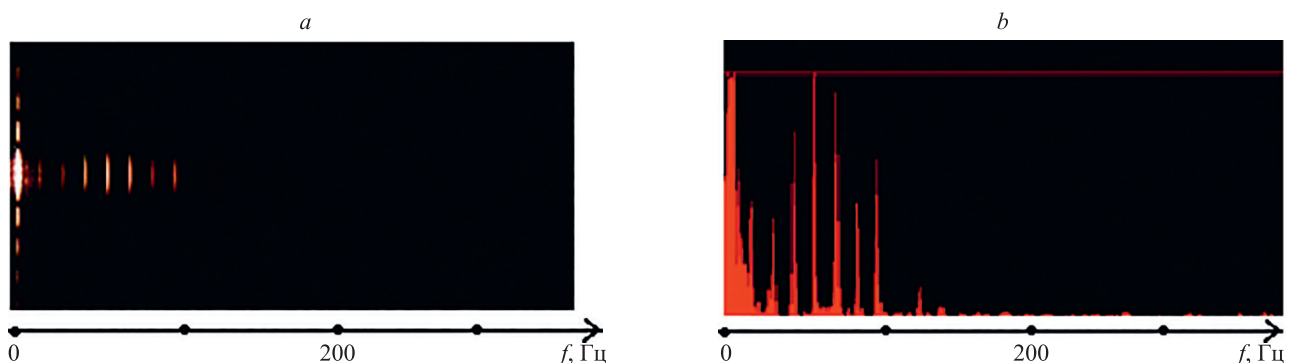


Рис. 3. Выходной сигнал оптической системы (энергетический спектр с фурье-процессора) при обработке низкочастотной составляющей электрокардиосигнала сверхвысокого разрешения (*a*) и его сечение по оси частот (*b*)

Fig. 3. Output signal of the optical system (power spectrum) while the processing of ultra-high resolution electrocardiac signal low frequency component (*a*) and its cross section along the frequency axis (*b*)

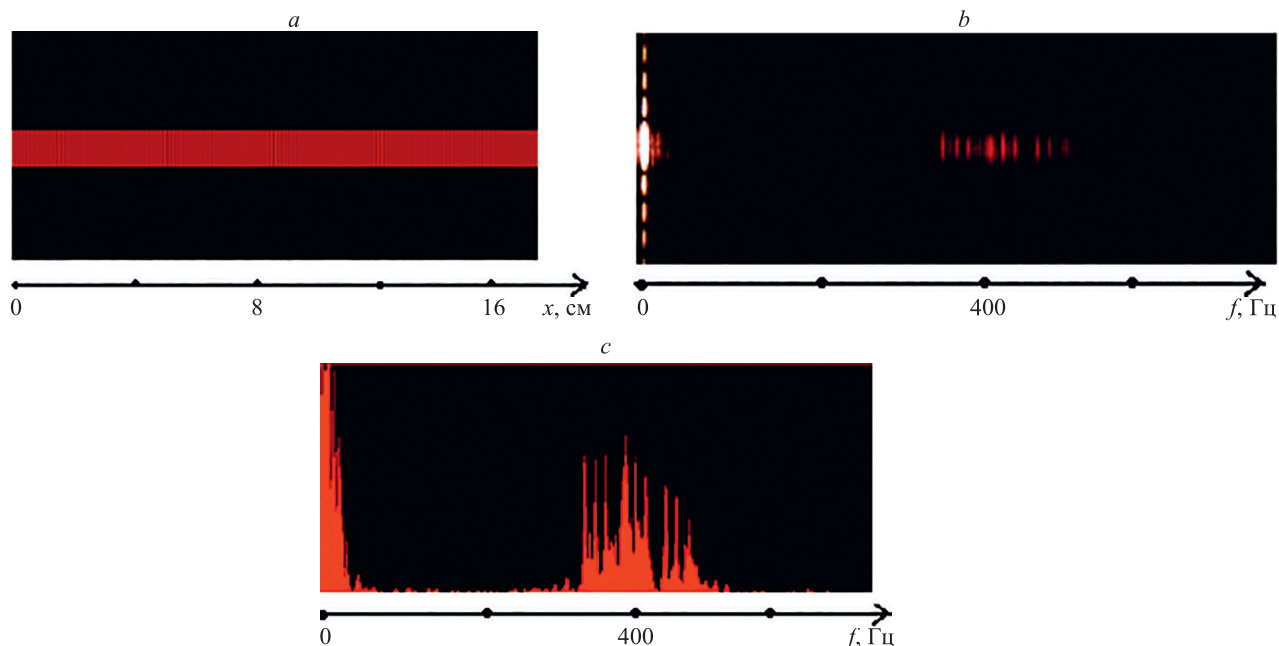


Рис. 4. Входной (a) и выходной (b) сигналы оптической системы; сечение выходного сигнала по оси частот (c) при обработке высокочастотной составляющей электрокардиосигнала сверхвысокого разрешения

Fig. 4. Input (a) and output (b) signals of optical system; cross section of the output signal along the frequency axis (c) while the processing of ultra-high resolution electrocardiac signal high frequency component

Заключение

Применение рассмотренных методов оптической и акустооптической обработки биоэлектрических сигналов, а также их совместное использование в раз-

личных комбинациях позволит в отдельных специфических случаях существенно упростить процедуры обработки таких информационных сигналов и уменьшить массогабаритные характеристики реализующих устройств.

Литература

1. Зайченко К.В., Гуревич Б.С. Спектральная обработка биоэлектрических сигналов // Медицинская техника. 2021. № 1. С. 12–14. <https://doi.org/10.1007/s10527-021-10062-6>
2. Гуляев Ю.В., Зайченко К.В. Электрокардиография сверхвысокого разрешения. Задачи. Проблемы. Перспективы // Биомедицинская радиоэлектроника. 2013. № 9. С. 5–15.
3. Зайченко К.В., Гуревич Б.С. Электроэнцефалография в расширенных амплитудном и частотном диапазонах // Научная сессия ГУАП: Сборник докладов научной сессии, посвященной Всемирному дню авиации и космонавтики. В 3-х ч. Ч. II. Технические науки. СПб.: ГУАП, 2019. С. 150–152.
4. Zaichenko K.V., Gurevich B.S., Kordyukova A.A. Method of reliable electrocardiographic control of ischemia appearance in investigations with experimental animals // Proc. of the 2021 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT). 2021. P. 78–81. <https://doi.org/10.1109/USBREIT51232.2021.9455029>
5. Yu F.T.S., Jutamulia S. Optical Signal Processing, Computing, and Neural Networks. New York: John Wiley & Sons, 1992. 419 p.
6. Наумов К.П., Ушаков В.Н. Акустооптические сигнальные процессоры. М.: Science Press, 2002. 80 с.
7. Petrunin V., Aksyonov E., Starikov G. Wavelet transform in optical processors: potentials and perspectives // Proceedings of SPIE. 2002. V. 4680. P. 256–263. <https://doi.org/10.1117/12.454687>
8. VanderLugt A. Optical Signal Processing. New York, N.Y.: Wiley, 1991. 632 p.
9. Feng W., Yan Y., Jin G., Wu M., He Q. Dual multichannel optical wavelet transform processor // Proceedings of SPIE. 1999. V. 3804. P. 249–255. <https://doi.org/10.1117/12.363971>
10. Wang Y., Ma L., Shi S. An optical method for production of Haar wavelet // Optics Communications. 2002. V. 204. N 1–6. P. 107–110. [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(02\)01246-4](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(02)01246-4)
11. Turpin T.M. Time integrating optical processors // Proceedings of SPIE. 1978. V. 154. P. 196–203. <https://doi.org/10.1117/12.938255>

References

1. Zaichenko K.V., Gurevich B.S. Spectral processing of bioelectric signals. *Biomedical Engineering*, 2021, vol. 55, no. 1, pp. 17–20. <https://doi.org/10.1007/s10527-021-10062-6>
2. Gulyaev Y.V., Zaichenko K.V. High-resolution electrocardiography. Task. Problem. Prospects. *Journal Biomedical Radioelectronics*, 2013, no. 9, pp. 5–15. (in Russian)
3. Zaichenko K.V., Gurevich B.S. Electroencephalography in the extended amplitude and frequency ranges. *SUAI Scientific Session: Conference proceedings of the scientific session dedicated to the World Day of Aviation and Cosmonautics. In 3 parts, Part II. Technical sciences*. St. Petersburg, SUAI, 2019, pp. 150–152. (in Russian)
4. Zaichenko K.V., Gurevich B.S., Kordyukova A.A. Method of reliable electrocardiographic control of ischemia appearance in investigations with experimental animals. *Proc. of the 2021 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT)*, 2021, pp. 78–81. <https://doi.org/10.1109/USBREIT51232.2021.9455029>
5. Yu F.T.S., Jutamulia S. *Optical Signal Processing, Computing, and Neural Networks*. New York, John Wiley & Sons, 1992, 419 p.
6. Naumov K.P., Ushakov V.N. *Acousto-Optical Signal Processors*. Moscow, Science Press, 2002, 80 p. (in Russian)
7. Petrunin V., Aksyonov E., Starikov G. Wavelet transform in optical processors: potentials and perspectives. *Proceedings of SPIE*, 2002, vol. 4680, pp. 256–263. <https://doi.org/10.1117/12.454687>
8. VanderLugt A. *Optical Signal Processing*. New York, N.Y., Wiley, 1991, 632 p.
9. Feng W., Yan Y., Jin G., Wu M., He Q. Dual multichannel optical wavelet transform processor. *Proceedings of SPIE*, 1999, vol. 3804, pp. 249–255. <https://doi.org/10.1117/12.363971>
10. Wang Y., Ma L., Shi S. An optical method for production of Haar wavelet. *Optics Communications*, 2002, vol. 204, no. 1-6, pp. 107–110. [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(02\)01246-4](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(02)01246-4)

12. Kellman P. Time integrating optical signal processing // *Optical Engineering*. 1980. V. 19. N 3. P. 370–375. <https://doi.org/10.1117/12.7972521>
13. Montgomery R.M. Acousto-optical signal processing system. Patent US3634749, 1972.
14. Zaichenko K.V., Gurevich B.S. Early diagnostics of ischemia by means of electrocardiographic signals processing using acousto-optic Fourier processors with time integration // *Proceedings of SPIE*. 2019. V. 11075. P. 110751U. <https://doi.org/10.1117/12.2535709>
15. Зайченко К.В., Гуревич Б.С. Акустооптическая вейвлет-обработка биоэлектрических сигналов // Письма в Журнал технической физики. 2022. Т. 48. № 1. С. 36–38. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2022.01.51877.18988>
16. Zaichenko K.V. High accuracy adaptive frequency measurements for low signals in acoustic optical processors // *Proceedings of SPIE*. 1994. V. 2051. P. 732–738. <https://doi.org/10.1117/12.165963>
17. Аристархов Г.М., Воробьев А.В., Гуляев Ю.В., Дмитриев В.Ф., Зайченко К.В. и др. Фильтрация и спектральный анализ радиосигналов. Алгоритмы. Структуры. Устройства. М.: Радиотехника, 2020. 504 с.
18. Kuzmin M.S., Rogov S.A. Spatial light modulator based on liquid-crystal video projector matrix for information processing systems // *Optical Memory & Neural Networks (Information Optics)*. 2013. V. 22. N 4. P. 261–266. <https://doi.org/10.3103/S1060992X13040103>
19. Кузьмин М.С., Рогов С.А. Ввод низкочастотных сигналов в оптические системы обработки информации с жидкокристаллической матрицей на входе // XI международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2022. С. 611–612.
20. Кузьмин М.С., Рогов С.А. Анализатор свернутого спектра с жидкокристаллическим устройством ввода сигналов // Письма в Журнал технической физики. 2014. Т. 40. № 15. С. 1–5.
21. Кузьмин М.С., Рогов С.А. Обработка одномерных сигналов с растровым вводом в двумерных оптических корреляторах // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. № 4. С. 156–158.
22. Кузьмин М.С., Рогов С.А. Оптический фурье-процессор с жидкокристаллическим устройством ввода информации // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 3. С. 23–29.
11. Turpin T.M. Time integrating optical processors. *Proceedings of SPIE*, 1978, vol. 154, pp. 196–203. <https://doi.org/10.1117/12.938255>
12. Kellman P. Time integrating optical signal processing. *Optical Engineering*, 1980, vol. 19, no. 3, pp. 370–375. <https://doi.org/10.1117/12.7972521>
13. Montgomery R.M. Acousto-optical signal processing system. Patent US3634749, 1972.
14. Zaichenko K.V., Gurevich B.S. Early diagnostics of ischemia by means of electrocardiographic signals processing using acousto-optic Fourier processors with time integration. *Proceedings of SPIE*, 2019, vol. 11075, pp. 110751U. <https://doi.org/10.1117/12.2535709>
15. Zaichenko K.V., Gurevich B.S. Acousto-optic wavelet processing of bioelectric signals. *Pis'ma v Zhurnal tehnichej fiziki*, 2022, vol. 48, no. 1, pp. 36–38. (in Russian). <https://doi.org/10.21883/PJTF.2022.01.51877.18988>
16. Zaichenko K.V. High accuracy adaptive frequency measurements for low signals in acoustic optical processors. *Proceedings of SPIE*, 1994, vol. 2051, pp. 732–738. <https://doi.org/10.1117/12.165963>
17. Aristarkhov G.M., Vorobev A.V., Guliaev Iu.V., Dmitriev V.F., Zaichenko K.V. et al. *Filtration and Spectral Analysis of Radio Signals*. Moscow, Publishing house “Radiotekhnika”, 2020, 504 p. (in Russian)
18. Kuzmin M.S., Rogov S.A. Spatial light modulator based on liquid-crystal video projector matrix for information processing systems. *Optical Memory & Neural Networks (Information Optics)*, 2013, vol. 22, no. 4, pp. 261–266. <https://doi.org/10.3103/S1060992X13040103>
19. Kuzmin M.S., Rogov S.A. Input of low-frequency signals into optical information processing systems with a liquid crystal matrix input. *Proc. of the XI International Conference Photonics and Information Optics*, Moscow, NRNU MEPhI, 2022, pp. 611–612. (in Russian)
20. Kuzmin M.S., Rogov S.A. A folded-spectrum analyzer with a liquid-crystal input device. *Technical Physics Letters*, 2014, vol. 40, no. 8, pp. 629–631. <https://doi.org/10.1134/S1063785014080082>
21. Kuz'min M.S., Rogov S.A. Processing of 1D signals with raster input in 2D optical correlators. *Technical Physics*, 2015, vol. 60, no. 4, pp. 631–633. <https://doi.org/10.1134/S1063784215040179>
22. Kuz'min M.S., Rogov S.A. Optical fourier processor with a liquid-crystal information-input device. *Journal of Optical Technology*, 2015, vol. 82, no. 3, pp. 147–152. <https://doi.org/10.1364/JOT.82.000147>

Авторы

Зайченко Кирилл Владимирович — доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург, 198095, Российская Федерация, [sc 55927706300](https://orcid.org/0000-0002-2881-4386), <https://orcid.org/0000-0002-2881-4386>, kvz235@mail.ru
Гуревич Борис Симхович — доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург, 198095, Российская Федерация, [sc 35756024100](https://orcid.org/0000-0002-7520-7087), <https://orcid.org/0000-0002-7520-7087>, bgurevich48@gmail.com
Рогов Сергей Александрович — доктор физико-математических наук, профессор, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация, [sc 7004559141](https://orcid.org/0000-0002-4251-1197), <https://orcid.org/0000-0002-4251-1197>, sarogov@mail.ru
Кордюкова Анна Алексеевна — младший научный сотрудник, Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург, 198095, Российская Федерация, [sc 57211856932](https://orcid.org/0000-0002-6099-4276), <https://orcid.org/0000-0002-6099-4276>, annygm00@mail.ru
Кузьмин Михаил Сергеевич — аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация, [sc 57211856932](https://orcid.org/0000-0001-6044-2423), <https://orcid.org/0000-0001-6044-2423>, ranlitik@gmail.com

Статья поступила в редакцию 12.07.2022
 Одобрена после рецензирования 22.08.2022
 Принята к печати 28.09.2022

Authors

Kirill V. Zaichenko — D. Sc. (Technology), Professor, Head of Laboratory, Institute for Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation, [sc 55927706300](https://orcid.org/0000-0002-2881-4386), <https://orcid.org/0000-0002-2881-4386>, kvz235@mail.ru
Boris S. Gurevich — D. Sc. (Technology), Chief Researcher, Institute for Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation, [sc 35756024100](https://orcid.org/0000-0002-7520-7087), <https://orcid.org/0000-0002-7520-7087>, bgurevich48@gmail.com
Sergey A. Rogov — D. Sc. (Physics & Mathematics), Full Professor, The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, Saint Petersburg, 193232, Russian Federation, [sc 7004559141](https://orcid.org/0000-0002-4251-1197), <https://orcid.org/0000-0002-4251-1197>, sarogov@mail.ru
Anna A. Kordyukova — Junior Researcher, Institute for Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation, [sc 57211856932](https://orcid.org/0000-0002-6099-4276), <https://orcid.org/0000-0002-6099-4276>, annygm00@mail.ru
Mikhail S. Kuzmin — PhD Student, The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, Saint Petersburg, 193232, Russian Federation, [sc 57211856932](https://orcid.org/0000-0001-6044-2423), <https://orcid.org/0000-0001-6044-2423>, ranlitik@gmail.com

Received 12.07.2022
 Approved after reviewing 22.08.2022
 Accepted 28.09.2022



Работа доступна по лицензии
 Creative Commons
 «Attribution-NonCommercial»