

Спектральная обработка биоэлектрических сигналов

Аннотация

Рассматриваются методы спектральной обработки электрокардиографических и электроэнцефалографических сигналов спектральными процессорами различных типов. Особое внимание уделяется новому авторскому методу акустооптической обработки биоэлектрических сигналов. Разработаны рекомендации для выбора характеристик применяемых спектральных процессоров с целью минимизации потерь информации. Подробно рассматривается специфика применения вейвлет-анализа таких сигналов.

Введение

В последние годы многие авторы уделяют внимание исследованию биоэлектрических сигналов (БЭС) в расширенных амплитудном и частотном диапазонах. В частности, в нашей научной школе (НШ-3455.2012.8) созданы и развиваются такие перспективные авторские методы исследования, как инструментальная электрофизиология сверхвысокого разрешения (ИЭФ СВР) [1], электрокардиография сверхвысокого разрешения (ЭКГ СВР) [2], [3] и электроэнцефалография сверхвысокого разрешения (ЭЭГ СВР) [4]. При этом ЭКГ СВР и ЭЭГ СВР являются частными случаями развития универсального метода ИЭФ СВР. Главной особенностью всех этих методов является расширение амплитудного и частотного диапазонов регистрации БЭС до минимального уровня амплитуды полезного сигнала около 10 нВ и до максимальной частоты его обработки порядка 2 кГц. Специфика такой реализации этих методов определяет и особые требования к выбору способов первичной и вторичной обработки БЭС [3].

При исследованиях БЭС одним из актуальных методов их обработки является спектральный анализ, позволяющий определять интересующие нас качественные и количественные характеристики сигналов. Разнообразные методы спектрального анализа могут быть классифицированы как по виду обработки сигналов (аналоговая, цифровая, аналого-цифровая), так и по типу обрабатывающих устройств (симулирующие программные, электронные и оптико-электронные).

К оптико-электронным относится метод спектральной обработки при помощи акустооптических устройств [5]. Долгое время оптико-электронная обработка БЭС считалась нереализуемой, поскольку рабочие частоты сигналов, подаваемые на вход стандартных акустооптических устройств, составляют десятки-сотни мегагерц, в то время как биоэлектрические сигналы имеют частотный диапазон от долей герца до единиц килогерц. Однако предложенные авторские подходы к применению акустооптических устройств спектрального анализа с временным интегрированием позволили осуществить обработку низкочастотных биоэлектрических сигналов.

В отличие от других типов БЭС электроэнцефалографические сигналы (ЭЭС) отличаются большим разнообразием. В связи с этим при реализации метода ЭЭГ СВР необходимо обеспечить

регистрацию и обработку всех характерных ритмов и элементов ЭЭГ-сигналов, а также всех типов вызванных потенциалов (ВП).

Для решения этой задачи наряду с использованием акустооптических устройств для обработки ЭЭС большой положительный эффект дает применение спектрального анализа на основе вейвлет-преобразования [6], который может быть реализован как аппаратным, так и программным способами.

Акустооптическая обработка электрокардиосигналов в расширенном частотном диапазоне

Основным отличительным достоинством метода акустооптической обработки БЭС, в частности электрокардиосигналов (ЭКС), является применение безынерционных акустооптических анализаторов спектра (АОС) с временным интегрированием [7] в качестве устройств, реализующих преобразование Фурье при обработке регистрируемых сигналов. По принципу работы такой АОС аналогичен акустооптическому корректору. При этом в анализаторе спектра обязательно применение опорного ЛЧМ-сигнала с прямоугольной огибающей, а в качестве второго информационного сигнала используется ЛЧМ-колебание, модулированное по амплитуде анализируемым ЭКС.

Анализ показывает [5], что если принять время накопления заряда на фотодетекторе равным длительности ЛЧМ-колебания, то накопленные заряды будут пропорциональны спектру мощности анализируемого сигнала. При этом время накопления в современных линейках или матрицах фотодетекторов может достигать единиц секунд. Разрешимый частотный интервал для АОС такого типа определяется временем накопления фотоприемника, поэтому он может составлять величину порядка десятков-сотен герц. Однако общая разрешающая способность такого устройства не превышает ее значения для АОС с пространственным интегрированием, поэтому полоса анализируемых частот может оказаться крайне невысокой и всего на 2-3 порядка превышать разрешимый частотный интервал (доли герца – единицы герц).

Такой диапазон недостаточен для обработки ЭКС, полученных методом ЭКГ СВР. Поэтому нами предложено использовать АОС с комбинированным пространственно-временным

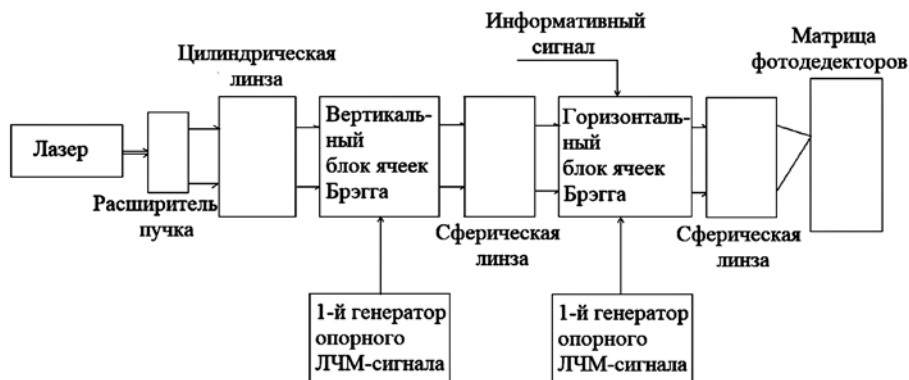


Рис. 1. Функциональная схема АОС с пространственно-временным интегрированием

интегрированием. В этом устройстве высокая разрешающая способность по частоте, характерная для устройств с временным интегрированием, оптимально сочетается с широкой полосой частот обработки ЭКС, что определяется особенностями анализаторов спектра с пространственным интегрированием. Функциональная схема такого устройства показана на рис. 1.

Устройство включает в себя два блока, содержащих по две одинаковых ячейки Брэгга. Первая пара ячеек расположена непосредственно за цилиндрической линзой, обеспечивающей необходимую форму коллимированного пучка света. Эти ячейки ориентированы встречно друг другу и запитываются одним и тем же опорным электрическим сигналом s_0 . Этот сигнал характеризуется линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) и может быть описан как

$$s_0(t) = A \cos \left(\omega_1 t + \frac{g t^2}{2} \right),$$

где ω_1 – угловая частота, а g – коэффициент пропорциональности, описывающий крутизну линейной модуляции по частоте. Первая сферическая линза обеспечивает фокусировку первого дифракционного порядка после первой ячейки в вертикальном блоке на апертуру первой ячейки в горизонтальном блоке, а первого дифракционного порядка после второй ячейки вертикального блока – на апертуру второй ячейки горизонтального блока. На первую ячейку Брэгга горизонтального блока подается также ЛЧМ-сигнал с периодом, равным L/v , где L – размер апертуры ячейки, а v – скорость акустической волны. На вторую ячейку горизонтального блока подается анализируемый сигнал, модулирующий по амплитуде ЛЧМ-колебание. Вторая сферическая линза фокусирует в плоскости ПЗС-матрицы (фотоприемника) двумерную картину, соответствующую спектру обрабатываемого сигнала. При этом одномерный спектр как бы развернут в растр таким образом, что считывание по вертикали соответствует грубым, а по горизонтали – точным частотным отсчетам.

Для осуществления акустооптической обработки сигналов ЭКГ СВР в их расширенном частотном диапазоне с разрешением по частоте в доли герца необходимо разработать модификацию АОС на базе линейки фотодетекторов с увеличенным временем накопления. Анализ показал, что стандартная КМОП-линейка типа elis-1024 обеспечивает время накопления порядка 1 с при комнатной температуре. Увеличение времени накопления до 10...20 с на этой линейке обеспечивается ее охлаждением до температуры примерно -10°C при помощи малогабаритного и недорогого охлаждающего элемента Пельтье. Его присоединение к фотоприемнику АОС осуществляется посредством термоинтерфейса, например термопасты.

Спектральные методы обработки электроэнцефалографических сигналов

В отличие от других типов биоэлектрических сигналов ЭЭС отличаются большим разнообразием, поэтому для получения информации необходимо обеспечить регистрацию и обработку следующих сигналов: всех характерных ритмов ЭЭГ; аperiodических и квазипериодических элементов ЭЭГ-сигнала, включая пики, острые волны и спайки; сложных комплексов периодических и аperiodических элементов, таких как комплекс «медленная волна – острая волна» и «медленная волна – пик»; всех типов вызванных потенциалов (ВП), связанных с воздействием различного вида стимулов, раздражающих рецепторы и эффекторные пути.

Метод ЭЭГ СВР обеспечивает регистрацию ЭЭС на всей их протяженности. Все это осуществляется в условиях воздействия различных шумов и помех. Расширение амплитудного и частотного диапазонов исследуемых ЭЭГ-сигналов сопровождается значительным ростом влияния помех, связанных с воздействием электромагнитных полей. В стандартном частотном диапазоне регистрации до 150 Гц лежит основная гармоника сетевой частоты (50 Гц) и одна дополнительная (100 Гц), а при расширении диапазона регистрации до 2000 Гц таких дополнительных гармоник становится около двух десятков. Суще-

ственно возрастают и другие внешние помеховые воздействия – наводки от электромагнитных излучений различной природы, что осложняет обнаружение и измерение параметров полезных сигналов, особенно ВП малой амплитуды, на фоне различного рода нестационарных помех.

Для реализации метода ЭЭГ СВР необходимо разработать комплекс методов спектральной обработки ЭЭС, который позволил бы выделить характерные элементы этих сигналов и определить их свойства. Наиболее эффективными считаются Фурье- и вейвлет-анализ. В частности, классический спектральный анализ может быть успешно применен, когда необходимо определять только усредненные во времени спектральные компоненты, представленные в анализируемом сигнале. Кроме того, эффективно может быть применен метод оконного преобразования Фурье (ОПФ). Алгоритм этого метода состоит из следующей последовательности процедур: 1) разделение записи ЭЭС на короткие перекрывающиеся фрагменты; 2) применение для каждого фрагмента быстрого преобразования Фурье с оконной функцией, например окном Хэмминга; 3) сдвиг окна на число значений, равных разности $w - n$, где w – длина окна, n – число значений, которые перекрываются в каждом сегменте. В соответствии с таким алгоритмом спектр, полученный при помощи ОПФ, является произведением сигнала и оконной функции, а результат оконного преобразования Фурье зависит от обоих параметров w и n . Поэтому при использовании ОПФ оказывается невозможным одновременно обеспечить хорошее разрешение как по времени, так и по частоте. Чем уже окно, тем выше разрешение по времени, но ниже по частоте, т. е. узкое окно не обеспечивает необходимой точности измерения частот в структуре исследуемого сигнала. Таким образом, фиксированный размер окна в методе ОПФ не позволяет описать локальные свойства паттернов ЭЭГ.

Другой метод обработки ЭЭС – вейвлет-анализ – позволяет получить информацию об изменении частотных характеристик сигнала во времени, т. е. узнать, в какие именно моменты времени возникают те или иные частотные компоненты. Следовательно, метод непрерывного вейвлет-преобразования особенно хорошо подходит к изучению ВП, поскольку его результаты содержат информацию не только о распределении энергии сигнала по частотам, но и о моментах времени, в которые происходят эти быстрые модуляции частот. В вейвлет-анализе используются окна различных размеров, благодаря чему удается найти оптимальный компромисс для частотно-временного разрешения анализируемого сигнала.

При обработке ЭЭС, полученных в режиме ЭЭГ СВР, важную роль играет выбор материнского вейвлета. Существуют две возможности: выбрать один из хорошо исследованных стандартных материнских вейвлетов либо использовать специально созданный вейвлет, сформированный с учетом заранее известных особенностей обрабатываемого сигнала. В существующей практике чаще всего используются стандартные материнские вейвлеты. Однако анализ показал, что многообразие форм ЭЭС говорит о том, что часто конечного набора стандартных материнских вейвлетов оказывается недостаточно и для обработки ВП необходимо иметь новый набор этих функций.

Помимо перечисленных, возможно применение акустооптических методов для обработки ЭЭС по аналогии с ЭКС. Авторами было предложено использовать акустооптические процессоры с временным интегрированием для обработки БЭС, в том числе и ЭЭС [8]-[10]. Смысл этого предложения состоит в том, что устройства с временным интегрированием, включающие в себя две ячейки Брэгга, на которые подаются входной информационный сигнал и опорное ЛЧМ-колебание, обеспечивают спектральное разрешение, определяемое многоэлементным фотодетектором, входящим в состав устройства [5].

Принцип действия этих устройств аналогичен принципу работы акустооптических корреляторов. Нижняя граница спектрального диапазона обрабатываемого сигнала при по-

мощи АОС такого типа определяется временем накопления линейного фотодетектора. Ее величина может составлять единицы герц и даже меньше в зависимости от типа линейки фотоприемника.

Заключение

Метод акустооптической обработки БЭС обеспечивает полосу их анализа, равную $10^4 \dots 10^5$ разрешимых спектральных интервалов. Все изложенное позволяет утверждать, что применение АОС с пространственно-временным интегрированием обладает высокой эффективностью для безынерционной спектральной обработки ЭКС, полученных методом ЭКГ СВР.

Обработка ЭЭС, особенно полученных в режиме СВР, вполне эффективно может осуществляться рассмотренными спектральными процессорами, в частности для таких задач, как анализ острых волн и пиков и в особенности передних фронтов ВП. Это приводит к возможности диагностики развития ряда патологий головного мозга и центральной нервной системы, в том числе их ранних стадий.

Финансовая поддержка работы была обеспечена грантами Российского фонда фундаментальных исследований № 18-07-00830 и 19-07-00768.

Список литературы:

1. Zaichenko K.V., Zhmyleva A.A., Khrapov S.O., Logachev E.P., Gurevich B.S. Application of modern technologies in new ultra high resolution electrocardiography method / IEEE Xplore library. Proceedings of 2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT). Yekaterinburg, 14-15 May, 2020. PP. 0004-0007.
2. Зайченко К.В., Гуревич Б.С., Жмылева А.А., Князев А.А., Логачев Е.П. Методика электрокардиографических исследований при проведении экспериментов по созданию искусственной ишемии у подопытных животных // Медицинская техника. 2019. № 4. С. 17-20.
3. Зайченко К.В., Жмылева А.А., Логачев Е.П., Устинова Д.М., Храпов С.О. Медицинские аспекты применения радиолокационных методов обработки сигналов при реализации электрокардиографии сверхвысокого разрешения // Медицинская техника. 2021 (в печати).

4. Зайченко К.В., Гуревич Б.С. Электроэнцефалография в расширенных амплитудном и частотном диапазонах / Научная сессия ГУАП. Сб. докл.: в 3-х ч. Ч. II. Технические науки. – СПб.: ГУАП, 2019. С. 150-152.
5. 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. P. 110751U.
6. Зайченко К.В., Горелова Н.А., Омельченко В.П., Поливаный Ф.В. Частные решения процедур вторичной обработки ЭКС по методу ЭКГ СВР для поиска временных характеристик маркеров кардиопатологий // Биомедицинская радиоэлектроника. 2013. № 9. С. 31-38.
7. Проклов В.В., Ушаков В.Н. Акустооптические процессоры спектрального типа. – М.: Радиотехника, 2012.
8. Zaichenko K.V., Gurevich B.S. Features of electroencephalographic signals acousto-optic processing // Proceedings of SPIE. 2020. Vol. 11360. P. 1136003.
9. Зайченко К.В., Гуревич Б.С., Мажник И.В. Обработка сигналов электрокардиографии сверхвысокого разрешения с помощью акустооптических Фурье-процессоров с временным интегрированием / Научная сессия ГУАП. Сб. докл.: в 3-х ч. Ч. II. Технические науки. – СПб.: ГУАП, 2018. С. 52-55.
10. Зайченко К.В., Гуревич Б.С. Метод расчета характеристик многоэлементных фотоприемников для акустооптических устройств обработки биоэлектрических сигналов / Научная сессия ГУАП. Сб. докл.: в 3-х ч. Ч. II. Технические науки. – СПб.: ГУАП, 2019. С. 147-149.

*Кирилл Вадимович Зайченко,
д-р техн. наук, профессор, зав. лабораторией,
лаборатория «Радио- и оптоэлектронные
приборы для биоинформационных
и геномных технологий ранней
диагностики патологий живых систем»,
Борис Симхович Гуревич,
д-р техн. наук, гл. научный сотрудник,
ФГБУН «Институт аналитического
приборостроения РАН»,
г. С.-Петербург,
e-mail: kvz235@mail.ru*

*О.С. Сушкова, А.В. Габова, Л.А. Жаворонкова, А.В. Карабанов, И.А. Кершнер,
А.А. Морозов, М.В. Синкин, Р.А. Толмачева, Л.А. Чигалейчик, Ю.В. Обухов*

Методы анализа вейвлет-спектров биомедицинских сигналов для извлечения диагностической информации о некоторых патологиях головного мозга

Аннотация

Описаны впервые предложенные подходы к анализу вейвлет-спектров Морле электроэнцефалограмм, электромиограмм и акселерометрических сигналов, основанные на анализе частотно-временных распределений локальных экстремумов и хребтов вейвлет-спектрограмм. Представлены полученные результаты в диагностике ранней стадии болезни Паркинсона и эссенциального тремора, мониторинга послеоперационных пациентов с эпилепсией, оценке нарушений межканальной фазовой связанности ЭЭГ при когнитивных тестах пациентов после черепно-мозговой травмы.

Электроэнцефалография (ЭЭГ) позволяет осуществлять как скрининг пациентов, так и постоянный многосуточный мониторинг послеоперационных пациентов. Сигналы ЭЭГ нестационарны, поэтому развиваются различные методы их частотно-временного анализа, наиболее широко – вейвлет-анализа. Ниже представлены разработки новых подходов к выделению признаков некоторых патологий головного мозга, основанных на анализе частотно-временных распределений локальных экстремумов огибающей электромиограмм (ОЭМГ) и акселерометра (АКС) и хребтов вейвлет-спектрограмм ЭЭГ.

Для ранней диагностики болезни Паркинсона (БП) и эссенциального тремора (ЭТ), послеоперационных пациентов с эпилепсией и с черепно-мозговой травмой (ЧМТ) разработаны методы и алгоритмы анализа вейвлет-спектров ЭЭГ, ОЭМГ и сигналов АКС.

Ранняя диагностика болезни Паркинсона и эссенциального тремора

Для изучения вейвлет-спектров частотного диапазона 0,5...4 Гц огибающей сигналов поверхностной ОЭМГ мышц и