

09.1;09.7;10.2;14.2

**Акустооптическая вейвлет-обработка биоэлектрических сигналов**

© К.В. Зайченко, Б.С. Гуревич

Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: kvz24@mail.ru

Поступило в Редакцию 9 августа 2021 г.

В окончательной редакции 24 сентября 2021 г.

Принято к публикации 24 сентября 2021 г.

Одним из эффективных методов исследования характеристик информационных сигналов является их вейвлет-анализ. Впервые показана возможность вейвлет-обработки информационных сигналов на акустооптическом процессоре с временным интегрированием. Обоснована реализация на таком процессоре как вычисления спектра мощности, так и осуществления вейвлет-преобразования биоэлектрических сигналов в реальном масштабе времени. Приведен анализ, описывающий его работу в различных режимах.

**Ключевые слова:** вейвлет-анализ, биоэлектрические сигналы, акустооптические процессоры, временное интегрирование.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.01.51877.18988

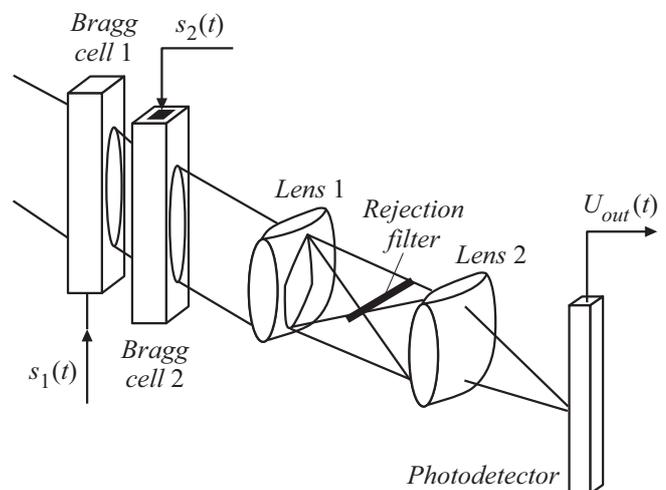
В последнее время вейвлет-анализ находит широкое применение в практике теоретических и прикладных научных исследований. При этом наибольшее развитие получили цифровые методы реализации вейвлет-анализа. Однако часто встречаются задачи, требующие обработки информационных сигналов в реальном масштабе времени. Такую возможность обеспечивают разработанные оптические вейвлет-процессоры корреляционного типа, снабженные набором вейвлет-фильтров [1–4]. Процедуры оптической обработки при этом предусматривают либо голографическую запись, преимущественно методами динамической голографии [2], либо запись изображений с использованием различных типов пространственных модуляторов света [3,4].

Использование акустооптических (АО) технологий для вейвлет-анализа было впервые предложено в оптических устройствах обработки изображений при неразрушающем контроле изделий [5]. При этом акустооптический модулятор выполняет вспомогательную функцию ввода данных в оптический процессор, который реализует вейвлет-преобразование.

Постановка и решение задачи, которой посвящена настоящая работа, были вызваны необходимостью информационного обеспечения экспериментальных исследований процессов развития искусственных патологий у подопытных животных на основе авторского метода инструментальной электрофизиологии сверхвысокого разрешения, которые проводит наша лаборатория „Радио- и оптоэлектронные приборы ранней диагностики патологии живых систем“ ИАП РАН совместно с физиологами Института экспериментальной медицины Федерального центра им. В.А. Алмазова [6]. В реальном времени потребовалось вычислять спектр мощности и осуществлять вейвлет-преобразование исследуемых биоэлектрических сигналов (БЭС), что в специфических условиях эксперимента можно осуществить лишь с использованием безынерционных АО-процессоров.

Поскольку обычные АО-устройства работают с сигналами частотой порядка десятков-сотен мегагерц, анализ на них низкочастотных БЭС потребовал реализации особых методов их обработки [7], в частности с использованием акустооптического спектроанализатора с временным интегрированием для вычисления в реальном времени спектра мощности данных сигналов [8]. Оптическая схема этого устройства представлена на рисунке.

Эта оптическая схема включает в себя две встречно ориентированные ячейки Брэгга, на одну из которых подается сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ-сигнал), промодулированный по амплитуде информационным сигналом  $s_1(t)$ , а на другую — опорный ЛЧМ-сигнал  $s_2(t)$  с прямоугольной огибающей. Линзы обеспечивают оптическое преобразование Фурье, а режекторный фильтр исключает нулевой дифракционный порядок. Многоэлементный линейный фотоприемник



Оптическая схема акустооптического спектроанализатора с временным интегрированием.

обеспечивает накопление заряда и формирует выходной сигнал.

Поскольку вейвлет-анализ на акустооптике до сих пор не проводился, потребовалось искать пути к его реализации. Само вейвлет-преобразование по определению представляет собой свертку анализируемой функции времени  $s_1(t)$  и функции материнского вейвлета  $s_2(t)$ , что описывается формулой

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} s_1(t) s_2^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (1)$$

где  $a$  и  $b$  — параметры, определяющие масштаб и временной сдвиг функции  $s_2(t)$  относительно информационного сигнала  $s_1(t)$  (звездочка означает комплексное сопряжение) [9]. Выяснилось, что впервые операцию свертки с помощью АО-процессора с временным интегрированием предложил осуществлять Монтгомери, который защитил свое техническое решение патентом США [10]. Схема конвольвера Монтгомери рассмотрена и обоснована в [11,12]. Она оказалась идентичной схеме, показанной на рисунке.

Согласно [11], результирующая интенсивность света  $I_d$  в плоскости многоэлементного линейного фотоприемника может быть записана как

$$\begin{aligned} I_d(x, t) &= \left| i(1/2)\tilde{s}_1 \left( t - \frac{x}{v} \right) + i(1/2)\tilde{s}_2 \left( t + \frac{x}{v} - T_a \right) \right|^2 \\ &= \frac{1}{4} \left| \tilde{s}_1 \left( t - \frac{x}{v} \right) \right|^2 + \frac{1}{4} \left| \tilde{s}_2 \left( t + \frac{x}{v} - T_a \right) \right|^2 \\ &\quad + \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ \tilde{s}_1^* \left( t - \frac{x}{v} \right) \tilde{s}_2 \left( t + \frac{x}{v} - T_a \right) \right\}, \quad (2) \end{aligned}$$

где  $\tilde{s}$  означает комплексный аналитический сигнал,  $x$  — координата в ячейках Брэгга и в фотоприемнике,  $v$  — скорость звука в среде звукопровода,  $T_a$  — временная апертура ячейки Брэгга. На выходе фотоприемника формируется заряд, который пропорционален энергии падающего света за время засветки и ограничивается допустимым временем интегрирования линейки. Эта энергия равна

$$\begin{aligned} E(x) &= \frac{1}{4} \int_T \left[ \operatorname{Re} \tilde{s}_1^* \left( t - \frac{x}{v} \right) \right]^2 dt \\ &\quad + \frac{1}{4} \int_T \left[ \operatorname{Re} \tilde{s}_2 \left( t + \frac{x}{v} - T_a \right) \right]^2 dt \\ &\quad + \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ \int_T \tilde{s}_1^* \left( t - \frac{x}{v} \right) \tilde{s}_2 \left( t + \frac{x}{v} - T_a \right) dt \right\}. \quad (3) \end{aligned}$$

Первые два члена уравнения (3) являются постоянными при достаточно большом времени интегрирования  $T$ , а третий член представляет собой свертку функций  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$ .

Приведенные выше данные позволили нам предложить использование конвольвера с временным интегрированием [10,11] для реализации вейвлет-преобразования информационного сигнала  $s_1(t)$  как его свертку с его материнским вейвлетом  $s_2(t)$ .

Точно такая же, как на рисунке, схема АО-процессора с временным интегрированием приведена в [13] для получения спектра информационного сигнала  $s_1(t)$ . Работа этой схемы подробно рассмотрена в [14]. В ней описаны такие же ЛЧМ-сигналы, как в схеме, представленной на рисунке, которые подаются на ячейки Брэгга:

$$\begin{aligned} s'_1(t) &= [1 + s_1(t)] \cos(\Omega_0 t + 0.5\gamma t^2), \\ s'_2(t) &= \cos(\Omega_0 t + 0.5\gamma t^2), \quad (4) \end{aligned}$$

где  $s'_1(t)$  представляет собой ЛЧМ-сигнал с начальной частотой  $\Omega_0$  и крутизной частотной модуляции  $\gamma$ , промодулированный по амплитуде информационным сигналом  $s_1(t)$ ;  $s'_2(t)$  — опорный ЛЧМ-сигнал с прямоугольной огибающей. Там же [14] показано, что комплексные огибающие этих сигналов имеют вид

$$\dot{u}_{s'_1}(t) = [1 + s_1(t)] \exp(i0.5\gamma t^2), \quad \dot{u}_{s'_2}(t) = \exp(i0.5\gamma t^2). \quad (5)$$

Как и в случае конвольвера, на выходе фотоприемника формируется заряд, пропорциональный энергии падающего света. Если отфильтровать постоянный пьедестал, то можно выделить сигнальную составляющую накопленного в фотоприемнике заряда [14]:

$$\begin{aligned} Q(x) &= \operatorname{Re} \left\{ A \exp(i2K_0 x) \int_{L/v}^{L/v+T} \dot{u}_{s'_1} \left( t - \frac{x}{v} \right) \dot{u}_{s'_2}^* \left( t + \frac{x}{v} \right) dt \right\} \\ &= \operatorname{Re} \left\{ A \exp(i2K_0 x) \int_{L/v}^{L/v+T} s_1 \left( t + \frac{x}{v} \right) \exp \left( -i \frac{2\gamma x t}{v} \right) dt \right\}, \quad (6) \end{aligned}$$

где  $K_0 = \Omega_0/v$ ,  $L$  — размер линейной апертуры акустооптической ячейки. Из выражения (6) следует, что накопленный заряд на фотоприемнике (его распределение по координате  $x$ ) представляет собой спектр сигнала  $s_1(t)$  на несущей пространственной частоте. Таким образом, рассматриваемая схема при подаче на нее соответствующих сигналов реализует формирование спектра информационного сигнала  $s_1(t)$ .

В конвольвере Монтгомери [10,11] предусмотрен ввод радиочастотных сигналов  $s_1(t)$  и  $s_2(t)$  в соответствующие две ячейки Брэгга для формирования их свертки, что позволило нам предложить реализацию вейвлет-преобразования информационного сигнала (3). На этой основе можно реализовать вейвлет-обработку биоэлектрического сигнала, используя амплитудную модуляцию радиочастотных несущих в обеих ячейках Брэгга (см. рисунок) информационным БЭС и его материнским вейвлетом. В этом случае по аналогии с (5) и (6)

выходной сигнал вейвлет-процессора–конвольвера — может быть представлен в виде

$$Q(x) = \operatorname{Re} \left\{ A \exp(i2K_0x) \int_{L/v}^{L/v+T} s_1 \left( t + \frac{x}{v} \right) s_2 \left( t - \frac{x}{v} \right) dt \right\} + C, \quad (7)$$

где  $C$  — пьедестал с переменной амплитудой. Следовательно, при использовании несущих радиочастотных сигналов накопленный заряд на CCD-линейке несет информацию о вейвлет-преобразовании сигнала  $s_1(t)$  по материнскому вейвлету  $s_2(t)$ .

В результате доказана возможность на одном АО-процессоре с временным интегрированием (см. рисунок) проводить вычисление как вейвлет-преобразования информационного сигнала  $s_1(t)$ , так и его спектра мощности.

Таким образом, в работе впервые показана возможность вейвлет-обработки информационных сигналов на акустооптическом процессоре с временным интегрированием, а также обоснована реализация на таком процессоре при подаче на его входы различных сигналов как вычисления спектра, так и осуществления вейвлет-преобразования БЭС в реальном масштабе времени. Это представляет интерес для многих практических приложений.

### Финансирование работы

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (государственное задание № 07500780-19-00, тема 0061-2019-0017).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] V. Petrun'kin, E. Aksyonov, G. Starikov, Proc. SPIE, **4680**, 212 (2002). DOI: 10.1117/12.454687
- [2] A. VanderLugt, *Optical signal processing* (Wiley Interscience, N.Y., 1991).
- [3] W. Feng, Y. Yan, G. Jin, M. Wu, Q. He, Proc. SPIE, **3804**, 249 (1999). DOI: 10.1117/12.363971
- [4] Y. Wang, L. Ma, S. Shi, Opt. Commun., **204**, 107 (2002). DOI: 10.1016/S0030-4018(02)01246-4
- [5] C.M. DeCusatis, J. Koay, D.M. Litynsky, P.K. Das, Proc. SPIE, **2643**, 17 (1995). DOI: 10.1117/12.222751
- [6] К.В. Зайченко, А.А. Кордюкова, Е.П. Логачев, М.Н. Лучкова, Медицинская техника, № 1, 21 (2021). [K.V. Zaichenko, A.A. Kordyukova, E.P. Logachev, M.N. Luchkova, Biomed. Eng., **55** (1), 31 (2021). DOI: 10.1007/s10527-021-10065-3].
- [7] Г.М. Аристархов, Ю.В. Гуляев, В.Ф. Дмитриев, К.В. Зайченко, В.В. Комаров, *Фильтрация и спектральный анализ радиосигналов. Алгоритмы, структуры, устройства* (Радиотехника, М., 2020), с. 18–48. DOI: 10.18127/B9785931082028
- [8] K.V. Zaichenko, B.S. Gurevich, Proc. SPIE, **11075**, 110751U (2019). DOI: 10.1117/12.2535709
- [9] И. Добеши. *Десять лекций по вейвлетам* (НИЦ „Регулярная и стохастическая динамика“, Ижевск, 2001), с. 115.
- [10] R.M. Montgomery, US. Patent 3 634 749 (1972).
- [11] W.T. Rhodes, Proc. IEEE, **69**, 65 (1981). DOI: 10.1109/PROC.1981.11921
- [12] В.Н. Ушаков, *Акустооптические процессоры корреляционного типа* (Радиотехника, М., 2007), с. 56–68.
- [13] T.M. Turpin, Proc. IEEE, **69**, 79 (1981). DOI: 10.1109/PROC.1981.11922
- [14] В.В. Проклов, В.Н. Ушаков, *Акустооптические процессоры спектрального типа* (Радиотехника, М., 2012), с. 65–71.