

УДК 621.327

## МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ СПЕКТРАЛЬНО-КОРРЕЛЯЦИОННОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММ

К. т. н. О. В. Пономарева<sup>1</sup>, Е. Ф. Тюрикова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова;

<sup>2</sup>Клинико-диагностический центр министерства здравоохранения Удмуртской Республики

Россия, г. Ижевск.

ponva@mail.ru

*Анализ работ по цифровой обработке электроэнцефалограмм, которая все более широко применяется при исследовании функционального состояния головного мозга, показал, что эффекты, присутствующие в цифровой обработке, на практике зачастую не учитываются. Это неизбежно приводит к ошибкам методического характера. В работе рассматриваются методы и алгоритмы спектрально-корреляционного анализа, учитывающие специфику цифровой обработки электроэнцефалографического сигнала.*

*Ключевые слова: энергетический спектр, корреляционная функция, электроэнцефалограмма, цифровая обработка сигналов.*

В настоящее время метод исследования функционального состояния головного мозга, основанный на регистрации его биоэлектрической активности через неповрежденные покровные ткани головы (электроэнцефалография), является важным инструментом объективной оценки функций мозга [1]. Несмотря на появление новых методов диагностики, основанных на компьютерной томографии и магнитно-резонансной томографии, электроэнцефалография не утратила своей роли и является незаменимым методом диагностирования и функционального контроля состояния пациента при тяжелых черепно-мозговых травмах, мозговых инфекциях, повреждениях мозговых сосудов, эпилепсии, при некоторых врожденных дефектах мозга и отравления барбитуратами. Данный метод позволяет определить ишемию мозга, кому, смерть, а также оценить восстановление функций мозга после остановки сердца или отравления барбитуратами; определить стадии сна при изучении действия психотропных средств, умственных расстройств, сновидений, а также провести исследования воздействия на человека космических полетов.

Анализ методов математической обработки электроэнцефалограмм (ЭЭГ) показал, что методы их компьютерной (цифровой) обработки как в спектральной, так и в корреляционной области, находят самое широкое применение в электроэнцефалографии [1]. Однако, и это следует подчеркнуть, практическое применение цифровой обработки сигналов (ЦОС) сопровождается рядом нежелательных эффектов [3], которые, как показывает анализ литературы по математической обработке ЭЭГ, авторами научно-прикладных работ зачастую игнорируется [2], что неизбежно приводит к ошибкам методического характера.

Целью настоящей работы является разработка методов и алгоритмов спектрально-корреляционной обработки электроэнцефалограмм, учитывающих специфику цифровой обработки электроэнцефалографического сигнала.

Исторически сложились два взаимосвязанных, но не подменяющих друг друга, направления изучения электроэнцефалограмм: спектральный подход (оценивание энергетических спектров, взаимных спектров, фазовых спектров, кепстров) и корреляционный подход (оценивание математических ожиданий, дисперсий, корреляционных функций, кросскорреляционных функций). Отметим следующие основные преимущества этих подходов: получение полезных описательных статистик, простых процедур оценки перспективности путей дальнейшего анализа электроэнцефалограмм, эффективного инструмента проверки постулируемых теоретических моделей.

В ЦОС широкое применение для корреляционной функции и для энергетического спектра дискретного случайного сигнала  $x(n)$  получили, соответственно, следующие оценки:

$$K_{x,N}(r) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-|r|} [x(n)[x(n+|r|)]], & 0 \leq |r| \leq N-1; \\ 0 & |r| > N-1 \end{cases} \quad (1)$$

$$G_{x,N}(k) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{kn} \right|^2; \text{ где } W_N = \exp(-j2\pi/N); k = \overline{0, N-1}. \quad (2)$$

Отметим, что оценки (1) и (2) выбраны интуитивно и не являются оптимальными в смысле какого-нибудь критерия. Известно, что оценки энергетических спектров согласно теореме Винера—Хинчина являются Фурье-преобразованиями соответствующих оценок корреляционных функций. Подчеркнем, при этом исследовался непрерывный, а не дискретный экспоненциальный базис, и свойства этих базисов не тождественны друг другу [4]. Можно показать, что оценки (1) и (2) связаны между собой следующим соотношением:

$$G_{x,N}(k) = \sum_{r=0}^{N-1} \left[ \left(1 - \frac{r}{N}\right) K_{x,N}(r) + \frac{r}{N} K_{x,N}(N-r) \right] W_N^{kr}. \quad (3)$$

Анализируя соотношения (1), (2) и (3), приходим к важному выводу: корреляционная функция в квадратных скобках выражения (3) не совпадает с (1), а является результатом наложения в корреляционной области корреляционных функций вида (1). Причина — дискретизация энергетического спектра с частотой в два раза меньшей, чем требуется при каноническом разложении Пугачева [3, 4]. Это и есть две важные особенности ЦОС, которые, как правило, не учитываются при обработке электроэнцефалограмм как в спектральной, так и в корреляционной областях.

Возможны два подхода к реализации методов и алгоритмов спектрально-корреляционной обработки электроэнцефалограмм, устраняющих этот эффект. Можно дополнить сигнал  $x(n), n = \overline{0, N-1}$ ,  $N$  нулями и найти дискретное преобразование Фурье (ДПФ) полученного сигнала. При этом мы, по сути дела, увеличиваем в два раза частоту дискретизации энергетического спектра (2), и решаем таким образом «в лоб» проблему наложения корреляционных функций (3). Неэффективность данного подхода очевидна (существенно увеличивается необходимый объем памяти и число операций выполняемых с нулевыми отсчетами). Второй путь это применение обобщения ДПФ — параметрического преобразования Фурье (ДПФ-П) [3, 4]. Заменяв ДПФ двумя ДПФ-П, получаем экономию необходимого объема памяти в два раза, а в числе вычислений в  $p/(p-1)$  раз, где  $p$  — основание алгоритма БПФ-П.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Рангайян Р. М. Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход. — Москва: Физматлит, 2007.
2. В. Л. Сахаров, А. С. Андриенко. Методы математической обработки электроэнцефалограмм. — Таганрог: «Антон», 2000.
3. Пономарева О. В. Развитие теории спектрального анализа дискретных сигналов на конечных интервалах в базисе параметрических дискретных экспоненциальных функций // Цифровая обработка сигналов. — 2010. — № 2. — С. 7—12.
4. Пономарев В. А., Пономарева О. В. Теория и применение параметрического дискретного преобразования Фурье // Цифровая обработка сигналов. — 2011. — № 1. — С. 2—6.

О. V. Ponomareva, E. F. Tyurikova

#### Methods and algorithms for spectral-correlation computer processing of the electroencephalogram.

Analysis of papers on the digital processing of electroencephalograms, which is increasingly used in the study of the functional state of the brain, showed that the inherent effects of the digital processing are often overlooked. This inevitably leads to methodological errors. In this paper we consider methods and algorithms for spectral-correlation processing, which take into account features of digital electroencephalographic signal processing.

Keywords: *energy spectrum, the correlation function, electroencephalogram, digital signal processing.*