



УДК 004.3833

М. С. Ча, А. Н. Калиниченко
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянов (Ленина)

Использование вейвлет-преобразования и фильтра Калмана для удаления окулографических артефактов из сигнала ЭЭГ

Рассмотрены аналитические методы удаления окулографического артефакта с использованием вейвлет-преобразования и фильтра Калмана. Представлен способ реализации алгоритма удаления окулографического артефакта с помощью пакета программного обеспечения Matlab. Приведено сравнение работы алгоритмов.

Электроэнцефалография, вейвлет-преобразование, фильтр Калмана, окулографический артефакт

Электроэнцефалографический сигнал, окулографический артефакт и проблемы его фильтрации. Сигнал электроэнцефалограммы (ЭЭГ), представляющий собой запись электрической деятельности мозга, играет ключевую роль при анализе состояния головного мозга. При записи в ЭЭГ-сигнале во время бодрствования здорового человека присутствуют альфа- и бета-ритмы с частотой 8...13 и 14...40 Гц соответственно. При анализе сигнала в записи встречаются многочисленные помехи, среди которых чаще всего встречаются артефакты моргания, или окулографические артефакты, и следы сигнала электрокардиограммы. Для компенсации последних может быть использована параллельная запись сигнала электрокардиограммы, которая затем удаляется из сигнала ЭЭГ. Однако удаление окулографических артефактов представляет собой сложную задачу. Эти артефакты имеют большую амплитуду, на порядок превышающую амплитуду сигнала ЭЭГ, порядка 200...300 мкВ. Таким образом, они сильно зашумляют сигнал ЭЭГ и повышают его дисперсию, что играет большую роль при расчетах различных параметров сигнала ЭЭГ при использовании периодометрического, спектрального и корреляционного анализа. Примечательны данные артефакты еще и тем, что не имеют опреде-

ленной формы для разных пациентов, но у одного пациента они по форме одинаковы. Также эти артефакты имеют характер локального события. Из-за указанных особенностей окулографического артефакта анализ в частотной области крайне затруднен. Вдобавок ко всему сам сигнал ЭЭГ во время снятия идет в реальном времени, что осложняет использование преобразования Фурье, где в качестве базиса используются бесконечные функции синуса и косинуса. И хотя использование оконных функций несколько облегчает ситуацию, в таких случаях целесообразнее использовать вейвлет-преобразование.

Вейвлет-преобразование и вейвлет-разложение. Вейвлет-преобразование (англ. Wavelet transform) – интегральное преобразование, которое представляет собой свертку вейвлет-функции с сигналом. Вейвлет-преобразование переводит сигнал из временного представления в частотно-временное. В его основе лежат так называемые вейвлеты – «волночки», в отличие от преобразования Фурье, где используются бесконечные функции синусоиды. Таким образом, с помощью вейвлет-преобразования можно получить так называемый локальный спектр – спектр отрезка сигнала без потерь в частотной составляющей, как это было бы при использовании преобразования Фурье.

Непрерывное преобразование:

$$(T^{\text{вейв}} f)(a, b) = |a|^{1/2} \int f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt;$$

дискретное преобразование:

$$T_{m,n}^{\text{вейв}}(f) = a_0^{-m/2} \int f(t) \psi(a_0^{-m}t - nb_0) dt,$$

где $\psi^{a,b}(s) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{s-b}{a}\right)$ – вейвлет; a – масштабирующий параметр; b – локализирующий параметр; $a = a_0^{-m}$, $b = nb_0 a_0^{-m}$.

Вейвлет-разложение (англ. Wavelet decomposition) – метод анализа, основанный на вейвлет-преобразовании, заключающийся в разложении исходного сигнала на масштабированную функцию и детализирующие коэффициенты. На рис. 1 представлено вейвлет-разложение до 2-го уровня, где $X(n)$ – исходный сигнал, который проходит параллельно через два фильтра: высокой частоты ($h(n)$) и низкой частоты ($g(n)$). Таким образом, получают детализирующие коэффициенты 1-го уровня сигнала и его масштабированную функцию 1-го уровня, которую затем пропускают через два фильтра, получая детализирующие коэффициенты 2-го уровня сигнала и масштабированную функцию 2-го уровня. Данный алгоритм позволяет осуществить вейвлет-разложение сигнала до определенного уровня. Изменяя полученные коэффициенты и масштабированную функцию, можно добиться определенного уровня фильтрации. В данной статье предложен следующий способ удаления артефакта: получить чистый сигнал артефакта и вычесть его из сигнала ЭЭГ [1], [3].

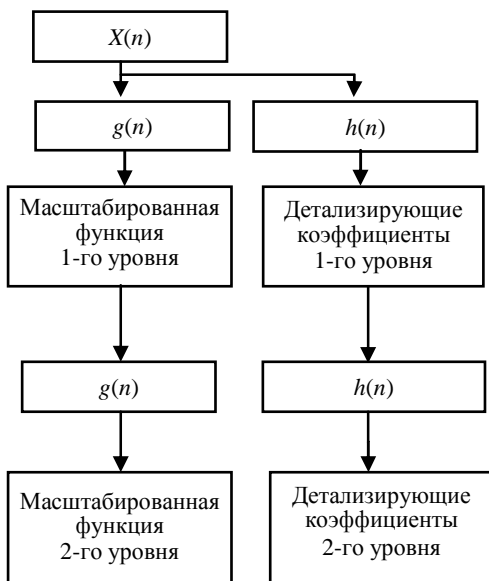


Рис. 1

Алгоритм удаления окулографических артефактов в общем виде состоит из следующих этапов:

- поиск окулографических артефактов с помощью порогового алгоритма, позволяющий обрабатывать не весь сигнал ЭЭГ, а лишь участок с окулографическим артефактом;
- дискретное вейвлет-разложение выбранного участка;
- обработка различных уровней разложения с помощью алгоритма очистки;
- воссоздание окулографического артефакта из обработанного вейвлет-разложения;
- удаление окулографического артефакта из данного сигнала ЭЭГ.

В данной статье анализируются и сравниваются два алгоритма удаления окулографических артефактов, основанных на вейвлет-преобразовании: комбинация вейвлет-преобразования и фильтра Калмана и трешолдинг (англ. Thresholding).

Фильтр Калмана – алгоритм фильтрации, который использует переходную характеристику системы, управляющие воздействия и погрешности для предсказания истинного состояния системы в следующий отрезок времени. В данном случае алгоритм предсказывает истинное значение окулографического артефакта.

Алгоритм фильтрации Калмана состоит из нескольких основных частей:

- установки начальных значений;
- предсказания будущего состояния;
- корректировки значений.

Начальными значениями, используемыми для решения задачи фильтрации ЭЭГ, являются дисперсия фильтруемого сигнала, теоретическая дисперсия сигнала чистого ЭЭГ и набор детализирующих коэффициентов и масштабированной функции. Собранный сигнал после такой фильтрации представляет собой чистый окулографический артефакт, который затем удаляется из сигнала ЭЭГ [4], [5].

Трешолдинг – алгоритм фильтрации вейвлет-разложения, основанный на пороговых значениях. Ключевую роль в данном алгоритме играет порог λ . Существует множество способов определения этого параметра, однако в случае сигнала ЭЭГ стоит использовать «обнуление» определенных детализирующих коэффициентов и масштабированной функции. На рис. 2 представлена гистограмма мощности вейвлет-разложения сигнала ЭЭГ до 7-го уровня.

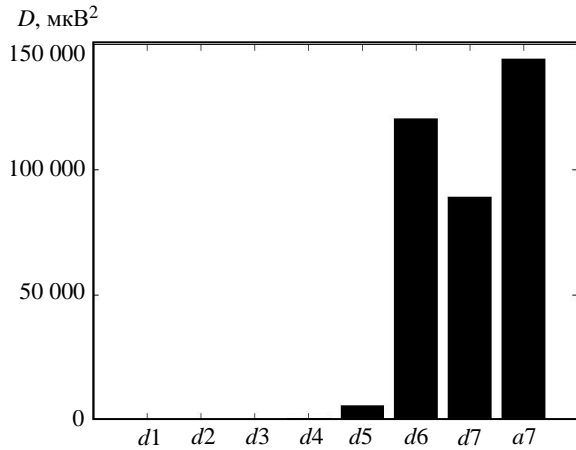


Рис. 2

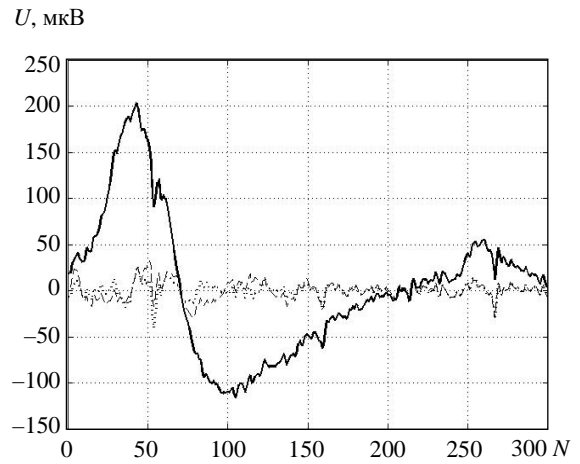


Рис. 4

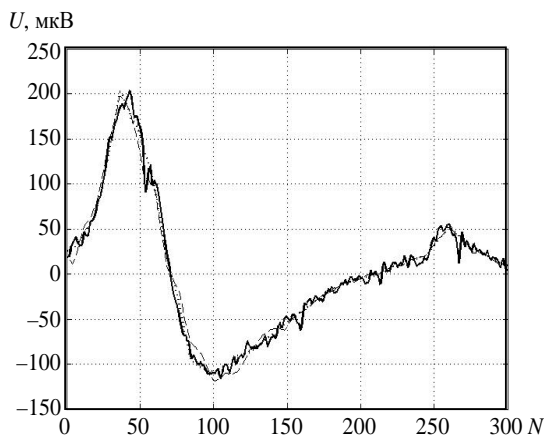


Рис. 3

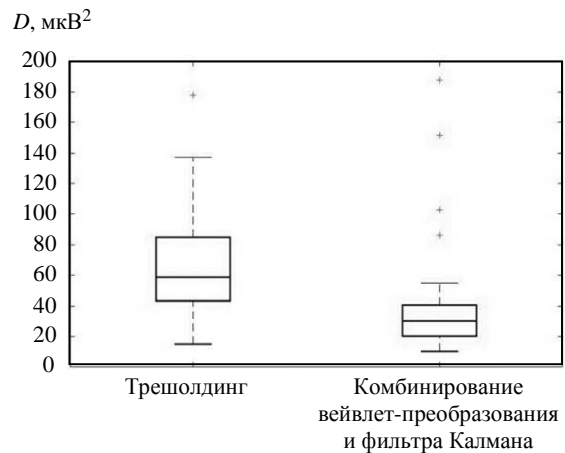


Рис. 5

Детализирующие коэффициенты, несущие информацию о чистом ЭЭГ, находятся на уровнях 1–4. Информация об окулографическом артефакте находится на уровнях 5–7.

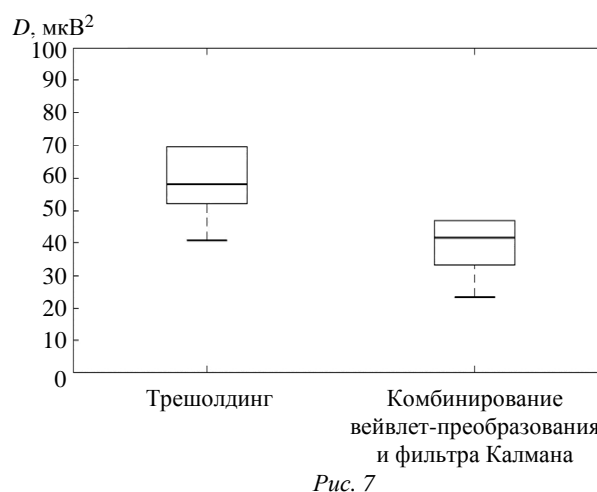
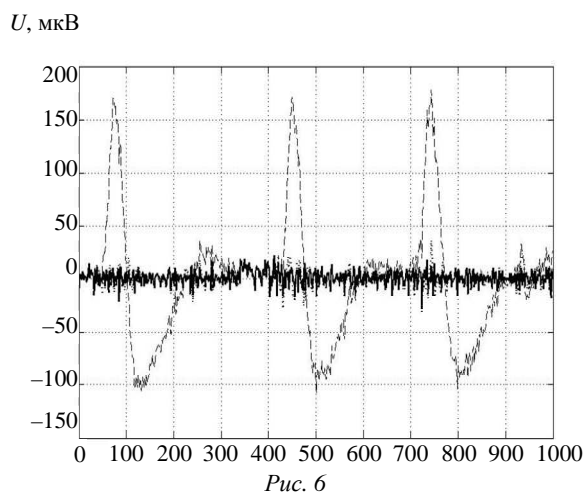
Сравнение работы алгоритмов на реальных сигналах. Для проверки работы алгоритма используется значение падения дисперсии. Данный критерий был выбран на основании принципа компенсации помех, предложенного Б. Уидроу [2]. На рис. 3 представлены выделенные из сигнала ЭЭГ окулографические артефакты, которые затем удаляются из сигнала ЭЭГ, также представленного на данном графике. Штриховая линия – трешолдинг, пунктирная линия – комбинирование вейвлет-преобразования и фильтр Калмана. Сплошной жирной линией обозначен сигнал ЭЭГ. На рис. 4 показана работа фильтров: сплошной жирной линией обозначен сигнал ЭЭГ; сигнал, очищенный после трешолдинга, – пунктирной линией; штриховой линией обозначен сигнал, обработанный комбинированием вейвлет-преобразования и фильтра Калмана.

Помимо визуальной оценки работы алгоритмов приведены значения дисперсии разных участков ЭЭГ после обработки двумя алгоритма-

ми. Данные представлены в виде боксплотов (англ. Boxplot) или диаграмм распределения на рис. 5. Начальное значение дисперсии необработанных участков сигнала ЭЭГ равно порядка 7000 mkB². Для фильтрации были использованы участки сигнала ЭЭГ с явными пиками окулографического артефакта. По приведенной диаграмме распределения видно, что использование вейвлет-преобразования и фильтра Калмана дает лучший результат, чем использование трешолдинга на тех же участках сигнала ЭЭГ.

На рис. 6 представлена работа полного алгоритма удаления окулографического артефакта из сигнала ЭЭГ. Штриховой линией обозначен исходный сигнал ЭЭГ, сплошной – трешолдинг, пунктирной – комбинация вейвлет-преобразования и фильтра Калмана.

На рис. 7 приведены значения дисперсии после обработки данных участков сигнала ЭЭГ в виде диаграмм распределения. Начальное значение дисперсии необработанного сигнала ЭЭГ 5677.6 mkB².



На рис. 7 заметна разница падения дисперсии между использованием трешолдинга и комбинации вейвлет-преобразования и фильтра Калмана.

Использование вейвлет-преобразования позволяет настроить систему для обработки сигнала ЭЭГ в реальном времени без потерь в преобразовании. Комбинирование вейвлет-преобразования и фильтра Калмана имеет большие перспективы

для обработки биомедицинских сигналов, в частности ЭЭГ, так как имеет гибкую настройку как самого вейвлет-преобразования, так и фильтра Калмана. Также это позволяет создать на базе данного алгоритма встраиваемую библиотеку для различных медицинских аппаратов, используемых для анализа электроэнцефалограммы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воскобойников Ю. Е., Гочаков А. В., Колкер А. Б. Фильтрация сигналов и изображений: Фурье и вейвлет алгоритмы. Новосибирск: Изд-во НГАСУ (СИБСТРИН), 2010.
 2. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов / пер. с англ. Ю. К. Сальникова, под ред. В. В. Шахгильдяна. М.: Радио и связь, 1989.

3. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотичная динамика», 2001.
 4. Обидин М. В., Серебровский А. П. Очистка сигналов от шумов с использованием вейвлет-преобразования и фильтра Калмана // Информационные процессы. М., 2013. Т. 13.
 5. Kalman R. E. A new approach to linear filtering and prediction problem. Baltimore, 1960.

M. S. Cha, A. N. Kalinichenko
 Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

USING WAVELET TRANSFORM AND KALMAN FILTER FOR DELETING OF EYE-BLINKING ARTEFACT FROM EEG SIGNAL

Analytical methods of eye-blinking artefact removal using wavelet transform and Kalman filter are considered. A method for implementing an algorithm for the removal of an eye-blinking artefact using a Matlab software package was presented. The comparison of the operation of algorithms is given.

Electroencephalography, wavelet transform, Kalman filter, eye-blinking artefact