

МЕТОД УДАЛЕНИЯ ГЛАЗОДВИГАТЕЛЬНЫХ АРТЕФАКТОВ НА ЭЭГ ЧЕЛОВЕКА ПРИ РАСПОЗНАВАНИИ НЕОДНОЗНАЧНОГО ЗРИТЕЛЬНОГО ОБРАЗА

А. Е. Руннова^а, канд. физ.-мат. наук, доцент

М. О. Журавлев^{б, а}, канд. физ.-мат. наук, доцент

Е. Ю. Ситникова^в, доктор биол. наук, старший научный сотрудник

А. А. Короновский^{б, а}, доктор физ.-мат. наук, профессор

А. Е. Храмов^{а, б}, доктор физ.-мат. наук, профессор

^аСаратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., Саратов, РФ

^бСаратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, Саратов, РФ

^вИнститут высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва, РФ

Постановка проблемы: электроэнцефалография является незаменимым методом функционального исследования головного мозга человека. Однако регистрируемые данные неизбежно содержат помехи технической, нейрогенной и физиологической природы, в частности, мощные артефакты, вызванные движениями глаз. Существует множество методов удаления глазодвигательных помех, но они редко используются в повседневной практике из-за высокой вычислительной сложности в комплексе с высоким риском ошибки определения момента появления артефактов. **Цель исследования:** создание и апробация нового метода удаления глазодвигательных артефактов на электроэнцефалографических данных. **Результаты:** разработан новый метод удаления глазодвигательных артефактов на электроэнцефалографических данных с использованием электроокулографии. Метод базируется на предположении о независимости сигналов окулографии и электроэнцефалографии, что дает возможность вычитания сигнала движения глаз из электроэнцефалографических данных на основе применения ортогонального преобразования Грамма — Шмидта. Метод показал высокую эффективность удаления артефактов на электроэнцефалографии, вызванных спонтанными движениями глазных яблок (порядка 95–97 % у 15 испытуемых). Эффективность удаления глазодвигательных артефактов на электроэнцефалографии снижалась во время распознавания зрительного образа неоднозначного объекта (куба Неккера). **Практическая значимость:** данный метод может быть рекомендован для работы в автоматическом режиме онлайн в задачах, не связанных с зрительно-ориентированной когнитивной деятельностью. Рассогласование между сигналами электроэнцефалографии и электроокулографии, обнаруженное во время распознавания зрительного образа куба Неккера, может являться индикатором когнитивной нагрузки и может быть в перспективе использовано в интерфейсах «мозг-компьютер».

Ключевые слова — математическая обработка электроэнцефалографии, автоматический анализ электроэнцефалографии, куб Неккера, преобразование Грамма — Шмидта, электроокулография.

Введение

Электроэнцефалография остается незаменимым методом исследования механизмов головного мозга человека и животных. Метод регистрации электроэнцефалограмм (ЭЭГ) прост, доступен, неинвазивен и позволяет разработать практически любой, сколь угодно сложный дизайн эксперимента, практически не ограниченный по времени. Очевидным недостатком ЭЭГ является неизбежная зашумленность сигналов и наличие артефактов нейрогенной и технической природы (электромагнитные шумы и погрешности оборудования). Настоящая работа посвящена решению проблемы выделения и удаления глазодвигательных артефактов на ЭЭГ человека. Эти артефакты имеют мощную амплитуду и широкий диапазон частот (от минимальной спектральной частоты регистрации сигнала и до 8–15 Гц), изменяющийся во времени [1, 2]. Глазодвигательные артефакты можно обнаружить на ЭЭГ как в непосредственной близости от глаз, так и на значительном удалении, вплоть до затылочных областей, по-

этому проблема удаления этих артефактов является весьма актуальной.

В медицинских исследованиях фрагменты ЭЭГ, содержащие артефакты, удаляют вручную, что обусловлено высокой степенью моральной и юридической ответственности перед пациентом в случае ошибочной интерпретации данных ЭЭГ. На настоящий момент существует множество методов удаления глазодвигательных артефактов [2–12]. Среди наиболее эффективных необходимо упомянуть подходы на базе метода независимых компонент [4–6] и его усовершенствованной модификации — регрессионного анализа [9–11]. Однако эти подходы редко используются в повседневной практике из-за высокой вычислительной сложности в комплексе с высоким риском ошибки определения момента появления артефактов. Для эффективного удаления глазодвигательных артефактов на ЭЭГ необходима информация о движениях глаз — электроокулограмма (ЭОГ) — и сочетание двух процедур:

1) линейного вычитания сигнала ЭОГ из ЭЭГ с использованием эмпирически подобранных ве-

совых коэффициентов в зависимости от удаленности канала ЭЭГ от места регистрации ЭОГ; выделения фрагментов ЭЭГ, содержащих артефакты;

2) удаления фрагментов ЭЭГ, содержащих артефакты (вручную).

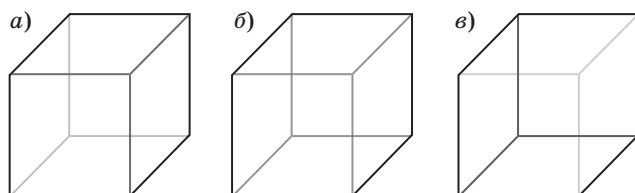
Описанная комбинация малоэффективна в экспериментах, где необходим анализ низкочастотной составляющей ЭЭГ, к которым относятся многие когнитивные исследования [13–17]. Удаление фрагментов ЭЭГ и линейное вычитание сигналов ведет к укорочению временного ряда ЭЭГ (до 10 % от исходной длительности), что снижает информативную ценность и искажает спектральный состав сигнала.

В настоящей работе описан новый метод удаления глазодвигательных артефактов на ЭЭГ, основанный на преобразовании Грамма — Шмидта с использованием данных ЭОГ. Метод был протестирован в серии экспериментов по распознаванию зрительного образа неоднозначного объекта — куба Неккера [14, 15]. Эта экспериментальная задача сочетает несколько психо- и нейрофизиологических проблем, связанных с процессом зрительного восприятия, пространственного мышления, принятия решений, концентрации внимания при выполнении однообразных задач и т. д.

Методика удаления глазодвигательных артефактов для ЭЭГ данных

Психофизиологический эксперимент

Была использована задача зрительного распознавания куба Неккера, представляющего собой неоднозначно воспринимаемый объект, изображенный без соблюдения правил перспективы, у которого ближняя и дальняя грани имеют одинаковые размеры и форму (рис. 1, а). Любая из граней куба Неккера может восприниматься либо как передняя (рис. 1, б), либо как задняя (рис. 1, в), и при его наблюдении одна объемная проекция самопроизвольно сменяется другой. В эксперименте изображения куба Неккера были



■ Рис. 1. Изображение куба Неккера: а — предъявляемое испытуемым; б — образ «левой» проекции; в — образ «правой» проекции

■ Fig. 1. The image of the Necker cube: а — presented to the testee; б — the image of the «left» projection; в — the image of the «right» projection

предъявлены испытуемому в течение короткого интервала времени (700 мс), после чего испытуемый сообщал экспериментатору о распознавании «левой» (см. рис. 1, б) или «правой» (см. рис. 1, в) проекции куба нажатием соответствующей кнопки. Интенсивность окраски линий, очерчивающих грани куба Неккера, менялась в случайном порядке в диапазоне от 100 до 40 % с шагом 20 % (100–80–60–40 %). Каждое из изображений куба Неккера, характеризующееся разной интенсивностью граней, предъявлялось 100–110 раз, пауза между двумя предъявлениями стимулов составляла от 2,5 до 3 с.

К исследованию были привлечены 15 здоровых добровольцев обоего пола в возрасте от 19 до 25 лет (студенты Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю. А.), обладающие нормальным (или компенсированным до нормального) зрением. Предварительно было проведено стандартное тестирование для выявления ведущего и ведомого глаз у каждого испытуемого. Анализ формы окулограмм у семи испытуемых не выявил различий между сигналами, зарегистрированными вблизи ведущего и ведомого глаз. В дальнейшем, для удобства и унификации экспериментальной работы, регистрировали вертикальную окулограмму только от правого глаза.

С целью снизить влияние фактора ошибки и оптимизировать процедуру фильтрации сигналов каждый испытуемый участвовал в трех-пяти экспериментальных сериях сходного дизайна. Каждая серия включала три стадии:

1) фоновую регистрацию ЭЭГ и ЭОГ в состоянии покоя с закрытыми глазами при соблюдении инструкции совершать минимум движений глазами (5 мин);

2) регистрацию ЭЭГ и ЭОГ во время горизонтальных и вертикальных движений глазами, а также при мигании (5 мин);

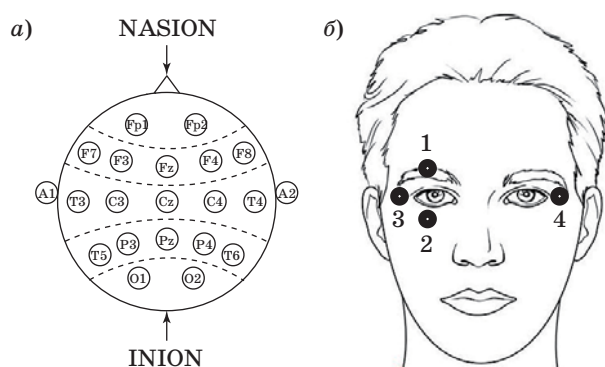
3) регистрацию ЭЭГ и ЭОГ в процессе распознавания куба Неккера (10 мин).

С учетом пауз между стадиями общая длительность эксперимента составляла порядка 20–23 мин.

Процедура регистрации ЭЭГ

Расположение электродов для регистрации ЭЭГ соответствовало стандартной схеме 10–20 [18], сенсоры для регистрации ЭОГ были расположены в области глаз (рис. 2, а, б). Для регистрации ЭОГ использовались 2 пары электродов: электроды 1 и 2 — для регистрации вертикальной окулограммы, а электроды 3 и 4 — горизонтальной (см. рис. 2, б).

Регистрацию сигналов ЭЭГ и ЭОГ проводили с помощью электроэнцефалографа «Энцефалан-ЭЭГР-19/26» (Медиком МТД, Россия) с временным



■ **Рис. 2.** Схема расположения электродов для регистрации ЭЭГ (а) и ЭОГ (б)

■ **Fig. 2.** The electrode scheme for registration EEG (a), and EOG (б)

разрешением (250 Гц). Данное оборудование было сертифицировано для использования в медицинских целях на территории РФ, стран СНГ, в зоне ЕС и Великобритании. Разрешение на экспериментальную работу выбранных дизайнера и оборудование было получено в комиссии по этике СГТУ им. Гагарина Ю. А.

Известно, что движения глаз сопровождаются изменениями электрического потенциала, поскольку глазное яблоко обладает электрическим дипольным моментом, формируемым за счет разности потенциалов между сетчаткой и роговой оболочкой глаза [1, 2, 14]. Форма глазодвигательных артефактов на ЭЭГ зависит от типа движения глазных яблок в горизонтальной/вертикальной плоскости при наличии/отсутствии вращательного момента, и в соответствии с этим глазодвигательные артефакты можно разделить на несколько типов [1, 2]. На рис. 2, б видно, что электроды 1–4 фиксировали разность потенциалов как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях, что позволило оценить весь спектр возможных движений глазного яблока.

Математический анализ

Сигналы ЭЭГ, регистрируемые у испытуемых с открытыми глазами, можно представить в виде линейной комбинации сигналов электрической активности головного мозга и помех, вызванных движениями глаз. В таком случае удаление помех (глазодвигательных артефактов) может быть выполнено путем математического преобразования сигналов ЭОГ и ЭЭГ с использованием метода ортогонализации Грамма – Шмидта [19]. Суть метода заключалась в следующем. Пусть $g_i(t)$ — сигнал ЭЭГ от i -го канала, $h(t)$ и $s(t)$ — сигналы ЭОГ, содержащие информацию о вертикальных и горизонтальных движениях глаз (соответственно, от пар сенсоров 1–2 и 3–4, см. рис. 2, б). Далее

эти сигналы подверглись процедуре ортогонализации Грамма – Шмидта:

$$g'_i(t) = g_i(t) - h^0(t) \int_{t_1}^{t_1+T} h^0(t') g_i(t') dt'; \quad (1)$$

$$\tilde{g}_i(t) = g'_i(t) - s^0(t) \int_{t_1}^{t_1+T} s^0(t') g'_i(t') dt', \quad (2)$$

где $\tilde{g}_i(t)$ — сигнал, очищенный от глазодвигательных артефактов; t — интервал времени, в течение которого было проведено удаление артефактов; $t \in [t_1, t_1 + T]$, где t_1 — момент начала, а T — длительность интервала. Сигналы $h^0(t)$ и $s^0(t)$ — это нормированные «опорные» сигналы ЭОГ, соответствовавшие вертикальным и горизонтальным движениям глаз [11, 12]:

$$h^0(t) = \frac{h(t)}{\|h(t)\|}, \quad \|h(t)\| = \sqrt{\int_{t_1}^{t_1+T} (h(t))^2 dt}; \quad (3)$$

$$s^0(t) = \frac{s(t)}{\|s(t)\|}, \quad \|s(t)\| = \sqrt{\int_{t_1}^{t_1+T} (s(t))^2 dt}. \quad (4)$$

Процедуре ортогонализации (1)–(4) подверглись сигналы, зарегистрированные от всех 19 каналов ЭЭГ. При отсутствии глазодвигательных артефактов на отдельных каналах ЭЭГ процедура ортогонализации не изменяла форму исходного сигнала ЭЭГ. Эта особенность следует из самой формы преобразования Грамма – Шмидта, что будет продемонстрировано ниже. Отметим, что горизонтальные движения глаз, максимально проявлявшиеся на сигнале ЭОГ $s(t)$, оказывали минимальное влияние на форму ЭЭГ. Помехи на сигналах ЭЭГ в значительной степени были обусловлены вертикальными движениями глаз, которые максимально проявлялись на сигнале ЭОГ от вертикально расположенной пары сенсоров $h(t)$, поэтому информация от горизонтально расположенной пары сенсоров $s(t)$ была избыточной, и далее в расчетах использовали только данные $h(t)$.

Для удаления глазодвигательных артефактов на ЭЭГ в реальном времени соотношения (1)–(4) были модифицированы следующим образом:

$$g'_i(t) = g_i(t) - h^0(t) \int_{t-T/2}^{t+T/2} h^0(t') g_i(t') dt'; \quad (5)$$

$$\tilde{g}_i(t) = g'_i(t) - s^0(t) \int_{t-T/2}^{t+T/2} s^0(t') g'_i(t') dt'; \quad (6)$$

$$h^0(t) = \frac{h(t)}{\|h(t)\|}, \quad \|h(t)\| = \sqrt{\int_{t-T/2}^{t+T/2} (h(t))^2 dt}; \quad (7)$$

$$s^0(t) = \frac{s(t)}{\|s(t)\|}, \quad \|s(t)\| = \sqrt{\int_{t-T/2}^{t+T/2} (s(t))^2 dt}, \quad (8)$$

где t — анализируемый интервал времени; T — ширина временного окна; $t + T/2$ — регистрируемый «текущий» момент времени. При реализации этого алгоритма в реальном времени сигнал ЭЭГ без артефактов $\tilde{g}_i(t)$ следовал с задержкой во времени $(t - T/2)$ относительно исходного сигнала ЭЭГ. Для эффективного удаления артефактов в реальном времени значение T составляло от 1,5 до 5 с.

Для статистической оценки результатов работы использовали показатель эффективности метода $E_{эфф}$:

$$E_{эфф} = (N_{ЭЭГ}/N_{ЭОГ}) \times 100 \%,$$

— это процентное соотношение числа верно удаленных глазодвигательных артефактов на каждом ЭЭГ-канале ($N_{ЭЭГ}$) к общему количеству глазодвигательных артефактов, выявляемых на ЭОГ ($N_{ЭОГ}$).

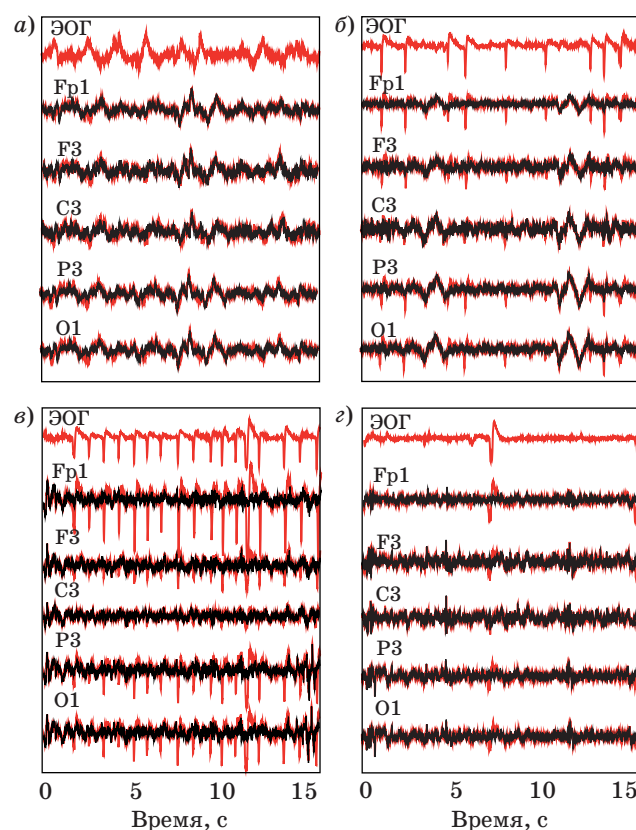
Результаты исследований и их анализ

На 1-й стадии эксперимента (фоновая запись с закрытыми глазами) на ЭЭГ отсутствовали артефакты, требующие удаления (рис. 3, а), и процедуру фильтрации не проводили. На 2-й стадии эксперимента (регистрация ЭЭГ и ЭОГ у испытуемых с открытыми глазами) была использована процедура Грамма — Шмидта для удаления глазодвигательных артефактов, вызванных горизонтальными и вертикальными движениями глазных яблок (соответственно рис. 3, б и в), а также вследствие мигания (рис. 3, г).

В таблице представлены результаты статистического анализа эффективности метода в группе из 15 испытуемых.

Проведенные расчеты показали высокую эффективность удаления глазодвигательных артефактов (в среднем от 94,9 до 97,9 %). Однако в лобных отведениях эффективность алгоритма была ниже, чем в остальных отведениях. Несмотря на то, что у подавляющего большинства испытуемых (73,3 %) эффективность удаления артефактов на лобной ЭЭГ была более 95 %, у 13,3 % испытуемых этот процент был ниже — 93,5 %, а у остальных 13,4 % еще ниже — от 91 до 93,4 %.

На 3-й стадии эксперимента испытуемые решали задачу распознавания неоднозначного объекта (куба Неккера), и результаты удаления



■ Рис. 3. Фрагменты ЭОГ и ЭЭГ, зарегистрированные на 1-й и 2-й стадиях эксперимента: а — фоновая запись во время 1-й стадии эксперимента; б-г — результат коррекции ЭЭГ на 2-й стадии эксперимента, где были эффективно удалены артефакты, вызванные горизонтальными (б) и вертикальными (в) движениями глазных яблок, а также миганием (г)

■ Fig. 3. Fragments of EOG and EEG recorded at the first and second stages of the experiment: а — background recording during the first stage of the experiment; б-г — the result of EEG correction in the 2nd stage of the experiment, where artifacts caused by horizontal (б) and vertical (в) movements of the eyeballs, as well as flashing (г)

- Эффективность метода удаления глазодвигательных артефактов (среднее $\pm$ стандартное отклонение)
- Efficiency of removal method extraocular artifacts (mean $\pm$ standard deviation)

Канал ЭЭГ	$E_{эфф}, \%$
Fp1	$94,9 \pm 2,1$
Fp2	$94,0 \pm 1,8$
F7	$97,5 \pm 3,1$
F8	$97,8 \pm 3,3$
C3	$96,1 \pm 1,1$
C4	$95,5 \pm 2,0$
P3	$95,0 \pm 0,75$
P4	$94,6 \pm 0,36$
O1	$97,9 \pm 0,1$
O2	$98,1 \pm 0,3$

глазодвигательных артефактов на этой стадии отличались от полученных на предыдущей. На рис. 4 показаны сигналы ЭОГ и ЭЭГ, зарегистрированные в процессе распознавания куба Неккера. Момент предъявления куба Неккера показан пунктирной линией. Серым прямоугольником выделен интервал времени, когда снижалась эффективность алгоритма коррекции ЭЭГ. Видно, что эффективность удаления артефактов снижалась на протяжении 500–700 мс. Отметим, что снижение эффективности использования метода Грамма — Шмидта наблюдалось через 400–600 мс после предъявления зрительного стимула (куба Неккера). Снижение эффективности удаления глазодвигательных артефактов на ЭЭГ было выявлено в 40–60 % случаев от общего числа предъявлений куба Неккера у разных испытуемых.

В данной работе продемонстрирована эффективность использования ортогонального преобразования Грамма — Шмидта для удаления глазодвигательных артефактов на ЭЭГ с использованием данных ЭОГ. Эта процедура позволила полностью удалить глазодвигательные артефакты на ЭЭГ, практически не нарушая структуру исходного сигнала. Эффективность удаления артефактов, вызванных спонтанными движениями открытых глаз, была максимальной в затылочной области (в среднем 97,9 %) и минимальной (в среднем 94,9 %) — в области лобных полюсов Fp1 и Fp3, где амплитуда глазодвигательных артефактов была наибольшей (вследствие близкого расположения к области глаз). Анализ существующей литературы [2, 4, 8, 10, 11] позволяет судить о том, что точность аналогичных методов не превышает 80 %. Таким образом, предлагаемый нами метод является достойным конкурентом существующих

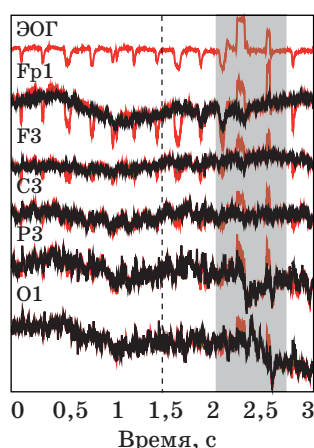
на настоящий момент способов удаления глазодвигательных артефактов, основанных на анализе независимых компонент (см., например, [4, 8, 10] и др.) и регрессионном анализе [2, 11].

Принципиальный недостаток этих методов — сложность преобразований и недостаточная точность определения артефактов на ЭЭГ. Методом, наиболее близким к разработанному нами, является метод удаления глазодвигательных артефактов на ЭЭГ, основанный на регрессионном анализе [11]. Этот метод включает несколько стадий обработки данных. В первую очередь — это анализ главных компонент сигнала ЭЭГ, содержащего глазодвигательные артефакты, в целях определения набора компонент, относящихся к глазодвигательным артефактам. Во-вторых, для выявленной группы компонент должна быть произведена фильтрация в диапазоне 1–8 ГГц, и в результате при помощи регрессионного алгоритма должны быть рассчитаны коэффициенты их ослабления. Рассчитанные коэффициенты используются в дальнейшем для упорядочивания пространственного распределения компонент глазодвигательных артефактов, а сами упорядоченные пространственные распределения используются для удаления самих глазодвигательных артефактов на ЭЭГ. Регрессионный метод является более точным, но более трудоемким по сравнению с традиционными методами, основанными на анализе главных компонент.

Мы обнаружили, что когнитивная нагрузка, связанная со зрительным распознаванием неоднозначного объекта (куба Неккера), снижает эффективность использования преобразования Грамма — Шмидта для удаления глазодвигательных артефактов на ЭЭГ. Подобное явление может быть объяснено нарушением линейных взаимодействий между сигналами ЭЭГ и ЭОГ и появлением новых нелинейных взаимодействий при формировании зрительного образа неоднозначного объекта. Иными словами, во время когнитивной деятельности, ассоциированной с пространственным восприятием, снижается степень линейной зависимости между сигналами ЭЭГ и ЭОГ, существовавшая при спонтанных движениях глаз, и могут преобладать нелинейные взаимодействия, поэтому метод ортогональной фильтрации оказывается менее эффективным. Таким образом, корректная работа описанного алгоритма в автоматическом режиме в условиях зрительно-ориентированной когнитивной нагрузки возможна, но требует контроля исследователя.

Заключение

Новый метод удаления глазодвигательных артефактов на ЭЭГ с использованием данных ЭОГ, основанный на ортогональном преобразовании Грамма — Шмидта, демонстрирует высокую



■ **Рис. 4.** Фрагменты ЭОГ (вертикальное расположение сенсоров) и ЭЭГ, зарегистрированные на 3-й стадии эксперимента

■ **Fig. 4.** Fragments of the EOG (vertical arrangement of sensors) and the EEG recordings at the experiment third stage

эффективность удаления артефактов, вызванных спонтанными движениями глазных яблок (в среднем от 94,9 до 97,9 % на разных каналах ЭЭГ). Данная процедура не нарушает структуру ЭЭГ и является простым, эффективным и надежным способом удаления глазодвигательных артефактов на ЭЭГ.

Во время решения когнитивной задачи, связанной со зрительным распознаванием неоднозначного объекта (куба Неккера), эффективность использования метода снижается.

Преимущество предлагаемого метода состоит в том, что он позволяет выявить рассогласование между сигналами ЭЭГ и ЭОГ, возникающее при решении зрительно-ориентированных задач, и может быть использован в качестве детектора когнитивной нагрузки, например, в различных типах интерфейсов «мозг-компьютер» [20].

Данный метод может быть рекомендован для работы в автоматическом режиме онлайн в задачах, не связанных с зрительно-ориентированной когнитивной деятельностью.

Коллектив авторов выражает искреннюю благодарность за плодотворные дискуссии и ценные замечания по фильтрации физиологических сигналов в ЭЭГ данным доктору биологических наук Георгию Алексеевичу Иваницкому (лаборатория высшей нервной деятельности человека ИВНД и НФ РАН, Москва).

Разработка метода выделения артефактов и экспериментальные исследования неоднозначного отображения (куб Неккера) были выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 16-12-10100). Исследования фоновой ЭЭГ выполнены при поддержке гранта РФФИ (проект № 16-29-08221).

Литература

1. Jung T. P., Makeig S., Humphries C., Lee T. W., McKeown M. J., Iragui V., Sejnowski T. J. Removing Electroencephalographic Artifacts by Blind Source Separation // *Psychophysiology*. 2000. N 37. P. 163–178.
2. Gratton G., Coles M. G. H., Donchin E. A New Method for off-line Removal of Ocular Artifact // *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*. 1983. N 55. P. 468–484.
3. Berg P., Scherg M. A Multiple Source Approach to the Correction of Eye Artifacts // *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*. 1994. N 90. P. 229–241.
4. Bell A. J., Sejnowski T. J. An Information-Maximization Approach to Blind Separation and Blind Deconvolution // *Neural Computation*. 1995. N 7. P. 1129–1159.
5. Lagerlund T. D., Sharbrough F. W., Busacker N. E. Spatial Filtering of Multichannel Electroencephalographic Recordings Through Principal Component Analysis by Singular Value Decomposition // *J Clin Neurophysiol*. 1997. N 1 (14). P. 73–82.
6. Jung T. P., Humphries C., Lee T. W., Makeig S., McKeown M. J., Iragui V., Sejnowski T. J. Extended ICA Removes Artifacts from Electroencephalographic Data // *Advances in Neural Information Processing Systems*. 1998. N 10. P. 894–900.
7. Kobayashi K., James C. J., Nakahori T., Akiyama T., Gotman J. Isolation of Epileptiform Discharges from Unaveraged EEG by Independent Component Analysis // *Clin Neurophysiol*. 1999. N 10 (110). P. 1755–1763.
8. Delorme A., Makeig S., Sejnowski T. Automatic Artifact Rejection for EEG Data using High-Order Statistics and Independent Component Analysis // *Proc. of the Third Intern. ICA Conf., San Diego, USA, December 9–13, 2001*. 2001. P. 9–12.
9. Ille N., Berg P., Scherg M. Artifact Correction of the Ongoing EEG using Spatial Filters Based on Artifact and Brain Signal Topographies // *Journal Clin Neurophysiol*. 2002. N 2(19). P. 113–124.
10. Joyce C. A., Gorodnitsky I. F., Kutas M. Automatic Removal of Eye Movement and Blink Artifacts from EEG Data using Blind Component Separation // *Psychophysiology*. 2004. N 41. P. 313–325.
11. Liu T., Yao D. Method for Removing Ocular Artifacts in Brain-Electrical Signal. Patent for Invention CN101474070, 2009.
12. Gotman J., Skuce D. R., Thompson C. J., Gloor P., Ives J. R., Ray W. F. Clinical Applications of Spectral Analysis and Extraction of Features from Electroencephalograms with Slow Waves in Adult Patients // *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*. 1973. N 35. P. 225–235.
13. Blake R., Logothetis N. K. Visual Competition // *Nature Reviews Neuroscience*. 2002. N 3(1). P. 13–21.
14. Corbetta M., Patel G., Shulman G. L. The Reorienting System of the Human Brain: from Environment to Theory of Mind // *Neuron*. 2008. N 58(3). P. 306–324.
15. Sterzer P., Kleinschmidt A., Rees G. The Neural Bases of Multistable Perception // *Trends in Cognitive Sciences*. 2009. N 13. P. 310–318.
16. Womelsdorf T., Fries P., Mitra P. P., Desimone R. Gamma-Band Synchronization in Visual Cortex Predicts Speed of Change Detection // *Nature*. 2006. N 439(7077). P. 733–736.
17. Maksimenko V. A., Lüttjohann Annika, Makarov V. V., Goremyko M. V., Koronovskii A. A., Nedaivozov V., Runnova A. E., van Luijtelaa Gilles, Hramov A. E., Boccaletti S. Macroscopic and Microscopic Spectral Properties of Brain Networks During Local and Global Synchronization // *Physical Review E*. 2017. Vol. 96. P. 012316. doi:10.1103/PhysRevE.96.012316

18. Jasper H. H. The Ten-Twenty Electrode System of the International Federation // *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*. 1958. N 10. P. 371–375.
19. Беклемишев Д. В. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры. — М.: Физматлит, 2005. — 308 с.

20. Maksimenko V. A., Heukelum S., Makarov V. V., Kelderhuis J., Lüttjohann A., Koronovskii A. A., Hramov A. E., Luijtelaar G. Absence Seizure Control by a Brain Computer Interface // *Scientific Reports*. 2017. N 7. P. 2487. doi:10.1038/s41598-017-02626-y

UDC 612.8 + 57.089

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.5.105

Removing Oculomotor Artifacts in Human EEG during Ambiguous Image Recognition

Runnova A. E.^a, PhD, Sc., Phys.-Math., Associate Professor, anefila@gmail.com

Zhuravlev M. O.^{b,a}, PhD, Sc., Phys.-Math., Associate Professor, zhuravlevmo@gmail.com

Sitnikova E. Yu.^c, Dr. Sc., Biol., Senior Researcher, jenia-s@mail.ru

Koronovskii A. A.^{b,a}, Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, alexey.koronovskii@gmail.com

Hramov A. E.^{a,b}, Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, hramovae@gmail.com

^aYuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77, Politechnicheskaya St., Saratov, Russian Federation

^bSaratov State University, 83, Astrakhanskaya St., Saratov, Russian Federation

^cInstitute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of RAS, 5A, Butlerova St. 117485, Moscow, Russian Federation

Introduction: Electroencephalography is an indispensable method for functional study of the human brain. However, recorded data inevitably contain technical, neurogenic and physiological noises, in particular, powerful artifacts caused by eye movement. There are many methods to remove oculomotor artifacts, but these are rarely used for practical purposes since most methods have high computational complexity combined with a large possibility of error in determining the moment when an artifact occurs. **Purpose:** We develop and validate a new method for the removal of oculomotor artifacts in electroencephalographic data. **Results:** The paper describes a new method for the removal of oculomotor artifacts in electroencephalographic data with the usage of electrooculography. The method is based on the assumption that oculography and electroencephalography signals are independent, which makes it possible to subtract the eye movement signal from the electroencephalographic data with the application of the Gram — Schmidt orthogonalization procedure. The method showed high efficacy of removing electroencephalographic artifacts caused by spontaneous eyeball movements (about 95–97% in 15 subjects). The efficacy of this method decreased when subjects were involved in visual perception of an ambiguous object (Necker cube). **Practical relevance:** We can recommend this method to be used in an automatic online mode for tasks not related to visual-oriented cognitive activity. The discrepancy between the signals of electroencephalography and electrooculography detected during the recognition of the Necker cube visual image may be a cognitive load indicator and can be used in brain-computer interface technology.

Keywords — Mathematical Processing of Electroencephalography, Automatic Analysis of Electroencephalography, Necker Cube, Gram — Schmidt Transformation, Electrooculography.

References

- Jung T. P., Makeig S., Humphries C., Lee T. W., McKeown M. J., Iragui V., Sejnowski T. J. Removing Electroencephalographic Artifacts by Blind Source Separation. *Psychophysiology*, 2000, no. 37, pp. 163–178.
- Gratton G., Coles M. G. H., Donchin E. A New Method for Off-Line Removal of Ocular Artifact. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 1983, no. 55, pp. 468–484.
- Berg P., Scherg M. A Multiple Source Approach to the Correction of Eye Artifacts. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 1994, no. 90, pp. 229–241.
- Bell A. J., Sejnowski T. J. An Information-Maximization Approach to Blind Separation and Blind Deconvolution. *Neural Computation*, 1995, no. 7, pp. 1129–1159.
- Lagerlund T. D., Sharbrough F. W., Busacker N. E. Spatial Filtering of Multichannel Electroencephalographic Recordings through Principal Component Analysis by Singular Value Decomposition. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 1997, no. 1 (14), pp. 73–82.
- Jung T. P., Humphries C., Lee T. W., Makeig S., McKeown M. J., Iragui V., Sejnowski T. J. Extended ICA Removes Artifacts from Electroencephalographic Data. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 1998, no. 10, pp. 894–900.
- Kobayashi K., James C. J., Nakahori T., Akiyama T., Gotman J. Isolation of Epileptiform Discharges from Unaveraged EEG by Independent Component Analysis. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 1999, no. 10 (110), pp. 1755–1763.
- Delorme A., Makeig S., Sejnowski T. Automatic Artifact Rejection for EEG Data using High-Order Statistics and Independent Component Analysis. *Proc. of the Third Intern. ICA Conf.*, San Diego, USA, December 2001, pp. 9–12.
- Ille N., Berg P., Scherg M. Artifact Correction of the Ongoing EEG using Spatial Filters Based on Artifact and Brain Signal Topographies. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 2002, no. 2(19), pp. 113–124.
- Joyce C. A., Gorodnitsky I. F., Kutas M. Automatic Removal of Eye Movement and Blink Artifacts from EEG Data Using Blind Component Separation. *Psychophysiology*, 2004, no. 41, pp. 313–325.
- Liu T., Yao D. *Method for Removing Ocular Artifacts in Brain-Electrical Signal*. Patent for Invention CN101474070, 2009.
- Gotman J., Skuce D. R., Thompson C. J., Gloor P., Ives J. R., Ray W. F. Clinical Applications of Spectral Analysis and Extraction of Features from Electroencephalograms with Slow Waves in Adult Patients. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 1973, no. 35, pp. 225–235.
- Blake R., Logothetis N. K. Visual Competition. *Nature Reviews Neuroscience*, 2002, no. 3(1), pp. 13–21.
- Corbetta M., Patel G., Shulman G. L. The Reorienting System of the Human Brain: from Environment to Theory of Mind. *Neuron*, 2008, no. 58(3), pp. 306–324.
- Sterzer P., Kleinschmidt A., Rees G. The Neural Bases of Multistable Perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 2009, no. 13, pp. 310–318.
- Womelsdorf T., Fries P., Mitra P. P., Desimone R. Gamma-Band Synchronization in Visual Cortex Predicts Speed of Change Detection. *Nature*, 2006, no. 439(7077), pp. 733–736.

17. Maksimenko V. A., Lüttjohann Annika, Makarov V. V., Goremyko M. V., Koronovskii A. A., Nedaivov V., Runnova A. E., van Luijteleaer Gilles, Hramov A. E., Boccaletti S. Macroscopic and Microscopic Spectral Properties of Brain Networks during Local and Global Synchronization. *Physical Review E*, 2017, vol. 96, p. 012316. doi:10.1103
18. Jasper H. H. The Ten-Twenty Electrode System of the International Federation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 1958, no. 10, pp. 371–375.
19. Beklemishev D. V. *Kurs analiticheskoi geometrii i lineinoi algebrы* [The Course of Analytic Geometry and Linear Algebra]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005. 308 p. (In Russian).
20. Maksimenko V. A., Heukelum S., Makarov V. V., Kelderhuis J., Lüttjohann A., Koronovskii A. A., Hramov A. E., Luijteleaer G. Absence Seizure Control by a Brain Computer Interface. *Scientific Reports*, 2017, no. 7, p. 2487. doi:10.1038/s41598-017-02626-y

Уважаемые авторы!

При подготовке рукописей статей необходимо руководствоваться следующими рекомендациями.

Статьи должны содержать изложение новых научных результатов. Название статьи должно быть кратким, но информативным. В названии недопустимо использование сокращений, кроме самых общепринятых (РАН, РФ, САПР и т. п.).

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и библиография) не должен превышать эквивалента в 20 страниц, напечатанных на бумаге формата А4 на одной стороне через 1,5 интервала Word шрифтом Times New Roman размером 13, поля не менее двух сантиметров.

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, заглавие, инициалы и фамилия автора (авторов), ученая степень, звание (при отсутствии — должность), полное название организации, аннотация и ключевые слова на русском и английском языках, электронные адреса авторов, которые по требованию ВАК должны быть опубликованы на страницах журнала. При написании аннотации не используйте аббревиатур и не делайте ссылок на источники в списке литературы.

Статьи авторов, не имеющих ученой степени, рекомендуется публиковать в соавторстве с научным руководителем, наличие подписи научного руководителя на рукописи обязательно; в случае самостоятельной публикации обязательно предоставляйте заверенную по месту работы рекомендацию научного руководителя с указанием его фамилии, имени, отчества, места работы, должности, ученого звания, ученой степени — эта информация будет опубликована в ссылке на первой странице.

Формулы набирайте в Word, не используя формульный редактор (Mathtype или Equation), при необходимости можно использовать формульный редактор; для набора одной формулы не используйте два редактора; при наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой; для установки размера шрифта никогда не пользуйтесь вкладкой Other..., используйте заводские установки редактора, не подгоняйте размер символов в формулах под размер шрифта в тексте статьи, не растягивайте и не сжимайте мышью формулы, вставленные в текст; в формулах не отделяйте пробелами знаки: + = -.

Для набора формул в Word никогда не используйте Конструктор (на верхней панели: «Работа с формулами» — «Конструктор»), так как этот ресурс предназначен только для внутреннего использования в Word и не поддерживается программами, предназначенными для изготовления оригинал-макета журнала.

При наборе символов в тексте помните, что символы, обозначаемые латинскими буквами, набираются светлым курсивом, русскими и греческими — светлым прямым, векторы и матрицы — прямым полужирным шрифтом.

Иллюстрации предоставляются отдельными исходными файлами, поддающимися редактированию:

— рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы предоставляйте в виде отдельных исходных файлов, поддающихся редактированию, используя векторные программы: Visio 4, 5, 2002-2003 (*.vsd); Coreldraw (*.cdr); Excel (*.xls); Word (*.doc); AdobeIllustrator (*.ai); AutoCad (*.dxf); Matlab (*.ps, *.pdf или экспорт в формат *.ai);

— если редактор, в котором Вы изготавливаете рисунок, не позволяет сохранить в векторном формате, используйте функцию экспорта (только по отношению к исходному рисунку), например, в формат *.ai, *.esp, *.wmf, *.emf, *.svg;

— фото и растровые — в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

Наличие подписочных подписей обязательно (желательно не повторяющих дословно комментарии к рисункам в тексте статьи).

В редакцию предоставляются:

— сведения об авторе (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученое звание, учебное заведение и год его окончания, ученая степень и год защиты диссертации, область научных интересов, количество научных публикаций, домашний и служебный адреса и телефоны, e-mail), фото авторов: анфас, в темной одежде на белом фоне, должны быть видны плечи и грудь, высокая степень четкости изображения без теней и отблесков на лице, фото можно представить в электронном виде в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением — не менее 300 pixels/inch при минимальном размере фото 40×55 мм;

— экспертное заключение.

Список литературы составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом:

— для книг и сборников — фамилия и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год, общее количество страниц;

— для журнальных статей — фамилия и инициалы авторов, полное название статьи, название журнала, год издания, номер журнала, номера страниц;

— ссылки на иностранную литературу следует давать на языке оригинала без сокращений;

— при использовании web-материалов указывайте адрес сайта и дату обращения.

Список литературы оформляйте двумя отдельными блоками по образцам lit.dot на сайте журнала (<http://i-us.ru/paperrules>) по разным стандартам: Литература — СИБИД РФ, References — один из мировых стандартов.

Более подробно правила подготовки текста с образцами изложены на нашем сайте в разделе «Оформление статей».

Контакты

Куда: 190000, Санкт-Петербург,
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ
Кому: Редакция журнала «Информационно-управляющие системы»
Тел.: (812) 494-70-02
Эл. почта: ius.spb@gmail.com
Сайт: www.i-us.ru