

# Задача обнаружения предсаккадных пиков в ЭОГ-методе распознавания движений глаз человека

Е. А. Храмцова  
elena.khramtsova@gmail.com

В последнее время стремительно развиваются технологии распознавания движений глаз человека. На биолого-почвенном факультете СПбГУ разрабатывается система «Окулографический интерфейс», основанная на электроокулографическом (ЭОГ) методе. В данной статье рассматривается один из способов повышения точности работы этой системы — обнаружение и использование предсаккадных пиков. В статье предложен алгоритм распознавания предсаккадных пиков, основанный на методе наименьших квадратов, описана программная реализация данного алгоритма. В статье представлено также экспериментальное программное окружение, позволяющее специалистам-биологам проводить дальнейшие исследования явления предсаккадных пиков.

## Введение

Задача распознавания движений глаз на данный момент является широко распространенной и востребованной на практике и имеет большое количество приложений в различных областях, таких как

медицинская диагностика, маркетинговые исследования, эргономика и т. д. [12]. В частности, существует задача управления курсором компьютерной мыши с помощью движения глаз — это чрезвычайно полезно людям с ограниченными возможностями, а также может использоваться в компьютерных играх и других специализированных приложениях [17].

За последние 20 лет появилось много систем, распознающих движения глаз человека (см. обзоры [20, 21]). Большинство современных коммерческих систем основаны на обработке видеоизображения глазного яблока человека [10]. Существуют также системы, основанные на отслеживании магнитных явлений, — склеральные катушки (*scleral search coils*) [16]: на глазное яблоко человека крепится проводящее кольцо, имеющее электромагнитные свойства, движение глаз распознается как изменение магнитного поля. Также используется электроокулографический метод (далее — ЭОГ-метод): глаз рассматривается как диполь, а его движение фиксируется как скачок электрического потенциала [6]. Каждый из этих методов обладает своими достоинствами и недостатками. Достоинствами ЭОГ-метода являются низкая вычислительная сложность, относительно низкая стоимость аппаратуры, широкие границы применимости и возможность использовать знания о физиологии процесса зрения для повышения точности работы.

На кафедре высшей нервной деятельности и психофизиологии биолого-почвенного факультета СПбГУ ведутся исследования физиологии глаз человека с помощью ЭОГ-метода [5, 6]. Открыт ряд новых физических явлений, разработан прототип системы управления курсором компьютерной мыши с помощью движения глаз под названием «Окулографический интерфейс». В рамках этих исследований было обнаружено, что перед каждым скачкообразным движением глазного яблока (то есть *саккадой*) происходит передача импульса с нерва на окологлазную мышцу, что сопровождается коротким резким скачком электрического потенциала — так называемым *предсаккадным пиком*. Таким образом, существует возможность узнать о движении глаз еще до его начала, что позволяет уменьшить время реакции системы на действия пользователя, а также повысить точность распознавания. Последнее является очень важным, поскольку качество распознавания движений глаз

в подобных системах в целом невысоко и дополнительные способы его повысить востребованы и необходимы.

В данной статье представлены результаты исследования возможности обнаружения предсаккадных пиков в рамках ЭОГ-метода. Предложен алгоритм распознавания предсаккадных пиков, основанный на известном методе наименьших квадратов [3]. Алгоритм был реализован и встроен в систему «Окулографический интерфейс». Было также разработано программное окружение для экспериментов и исследований явления предсаккадных пиков, позволяющее анализировать накопленные электроокулограммы и выявлять зависимости различных параметров предсаккадных пиков от параметров экспериментов и индивидуальных особенностей пользователей. Реализованные программные компоненты позволили специалистам-биологам обнаружить новое физиологическое явление — коррекционные микросаккады.

Я хотела бы выразить благодарность доценту биолого-почвенного факультета СПбГУ Дмитрию Белову за введение в предметную область, исходную постановку задачи, предоставление материалов по системе «Окулографический интерфейс», а также за помощь в интерпретации результатов экспериментов. Я также благодарна сотрудникам кафедры системного программирования СПбГУ Александру Пименову за конструктивное обсуждение алгоритма обнаружения предсаккадных пиков и Дмитрию Кознову за помощь в работе над текстом статьи. Наконец, я хочу выразить признательность своему товарищу по исследованиям Алексею Медведеву за плодотворное сотрудничество.

## 1. Обзор

В данном разделе представлено краткое введение в различные методы распознавания движений глаз, подробно рассмотрен ЭОГ-метод, описана система «Окулографический интерфейс», а также изложен метод наименьших квадратов, лежащий в основе алгоритма обнаружения предсаккадных пиков, разработанного и реализованного в рамках данного исследования.

### 1.1. Распознавание движений глаз: методы, продукты и направления применения

В последние годы все большей популярностью пользуются всевозможные альтернативные способы управления электронными устройствами, в частности компьютером. Это связано с развитием парадигмы «умный дом»<sup>1</sup>, популярностью компьютерных игр, а также с развитием технологий для людей с ограниченными возможностями. Одна из таких альтернатив — это интерфейс «глаз-компьютер».

Сильной стороной данного подхода является то, что управление глазами происходит быстрее, чем традиционное управление мышью: перед тем, как переместить мышь в какую-либо область экрана, пользователь смотрит на эту область<sup>2</sup>. Системы распознавания движений глаз находят широкое применение в различных областях — от медицинской диагностики до эргономики и маркетинговых исследований [12].

Опишем наиболее распространенные методы распознавания движений глаз.

- *Метод склеральных катушек.* На наружную оболочку глаза (склеру) пользователя-испытуемого крепится линза, на которую помещено проводящее кольцо, и анализируются изменения магнитного поля. Такой метод весьма точен, но неприятен пользователю (линзу с кольцом даже при обезболивании можно терпеть не более получаса). Поэтому данный подход годится только для лабораторных исследований. Кроме того, необходимое оборудование относительно дорого. Основной производитель в этой области — компания Chronos Vision, Германия<sup>3</sup>.
- *Метод обработки видеозображения.* Глаза снимаются на видеокамеру (при этом они, как правило, подсвечиваются инфракрасной лампой), затем по полученному изображению вычисляется позиция взгляда. Данный метод сейчас очень рас-

<sup>1</sup><http://www.dlna.org/>

<sup>2</sup>Подробнее о сравнении различных способов управления компьютером можно прочесть в работах [8, 22].

<sup>3</sup><http://www.chronos-vision.de>

пространен, и существует множество его коммерческих реализаций [1], а также open source проекты [14]. Достоинствами метода являются бесконтактность и возможность достижения высокой точности. Однако существуют и ограничения его применимости: относительно большая вычислительная мощность, невозможность использования при закрытых глазах, нестабильная работа при светлых (голубых) глазах, при дневном свете, накрашенных ресницах. Основные производители — Sensomotoric Instruments<sup>4</sup>, Micromedical Technologies<sup>5</sup>, а также компания Iscan<sup>6</sup>.

- *ЭОГ-метод.* Отслеживается изменение электрического потенциала на коже возле глаз. Подробнее о методе будет рассказано далее. Его достоинствами являются невысокая вычислительная сложность, дешевизна аппаратуры, а также небольшое количество ограничений при использовании. Недостаток — высокий уровень шума и, соответственно, более низкая точность. Для реализации данного метода подходит любой энцефалограф, а также нужны усилители и аналого-цифровой преобразователь.

Подробное описание теоретических методов распознавания движений глаз, вариантов применения этих методов и обзор существующих систем содержится в монографии [13].

## 1.2. ЭОГ-метод: основные понятия и реализация

Электроокулография является отдельной отраслью электрофизиологии. Согласно [6], глазное яблоко представляет собой электрический диполь, в котором сетчатка является отрицательным полюсом, а роговица — положительным. Таким образом, глаза являются источниками потенциального электрического поля, которое можно уловить даже в абсолютной темноте или при закрытых веках. Для

---

<sup>4</sup><http://www.smivision.com/>

<sup>5</sup><http://www.micromedical.com/>

<sup>6</sup><http://www.iscaninc.com/>

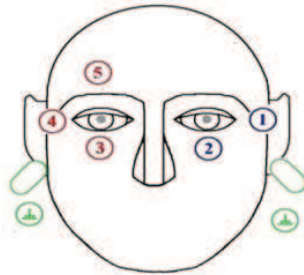


Рис. 1. Схема расположения электродов

этого к коже пользователя<sup>7</sup> вокруг глаз прикрепляются электроды. Схема расположения электродов, принятая в системе «Окулографический интерфейс», представлена на рис. 1. Заземления представляют собой клипсы на мочках ушей. Потенциал каждого электрода относительно заземления измеряется и записывается в соответствующий информационный канал. В итоге получается одна электроокулограмма, состоящая из пяти графиков<sup>8</sup>.

Когда глаз движется от центра к периферии, сетчатка приближается к одному электроду, а роговица — к другому, что означает смену ориентации диполя, а это влечет изменение электрического потенциального поля и значений потенциалов на каналах. Данный феномен наблюдается при скачкообразных смещениях взгляда (*саккадах* или *микросаккадах*), при медленном смещении взгляда в процессе визуального слежения, а также во время морганий.

Рис. 2 представляет собой фрагмент электроокулограммы, на котором серым цветом выделены саккады. Саккада представляется на электроокулограмме в виде характерного шаблона, состоящего из резкого переднего фронта и плавного затухания, значение сигнала

<sup>7</sup>У подобных систем есть две группы пользователей — испытуемые и экспериментаторы. Под термином «пользователь» будем понимать пользователей-испытуемых, когда это не оговорено специально.

<sup>8</sup>В рамках работы [2] реализована биполярная фильтрация, т. е. дополнительный анализ разности потенциалов между парами электродов 1–4 и 3–5, что повышает точность определения амплитуды вертикальных и горизонтальных движений соответственно.

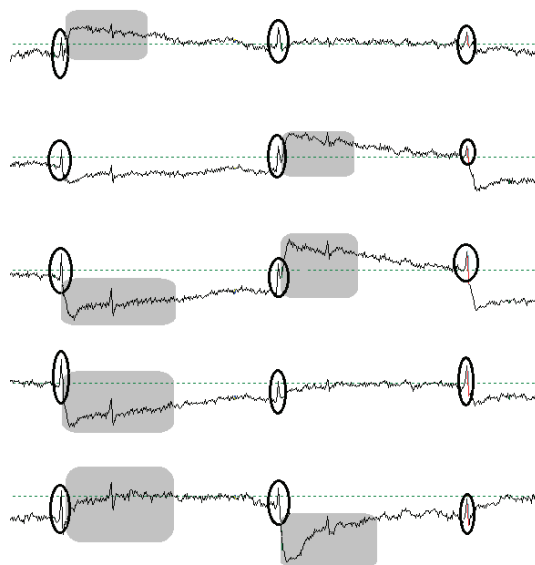


Рис. 2. Электроокулограмма: саккады и предсаккадные пики

ла на стыке между этими участками — амплитуда саккады. Кроме того, на данном рисунке обведены предсаккадные пики, о которых речь пойдет в *разд. 1.3.4*.

Путем анализа электроокулограммы можно восстановить направление и амплитуду движения глаз: знак изменения потенциала зависит от расположения электрода и от направления движения глаз, а амплитуда — от угла поворота глазного яблока.

Системы распознавания движений глаз, реализующие ЭОГ-метод, создаются с начала 1990-х годов. Однако их гораздо меньше, чем систем, основанных на обработке видеоизображения. Основным предназначением данных систем является улучшение качества жизни людей с ограниченными возможностями. Так, различными исследовательскими группами разработаны интерфейсы «глаз-компьютер» [9, 11, 18, 19], системы набора текстов при помощи глаз [23], системы контроля других устройств, например, инвалидной коляски [7, 15].

Существующие подходы имеют ряд общих проблем, самой серьезной из которых является низкая точность распознавания движений глаз. Подобно медицинской электроокулографии, здесь, как правило, аппаратно организована биполярная фильтрация, из-за чего теряется много полезной информации, такой как предсаккадные пики. Кроме того, во многих случаях отслеживается только горизонтальная составляющая движения глаз.

### 1.3. Система «Окулографический интерфейс»

Далее пойдет речь о системе распознавания движений глаз «Окулографический интерфейс», которая в виду отсутствия аппаратной биполярной фильтрации позволяет уловить больше артефактов, связанных с работой окулоmotorной системы человека, что повышает чувствительность распознавания.

#### 1.3.1. Предназначение и функциональность

Система является аналогом компьютерной мыши, т. е. позволяет перемещать курсор на мониторе в соответствии с движениями глаз пользователя. Система предназначена, в первую очередь, для людей с ограниченными возможностями, но может быть полезна всем, кто проводит много времени за компьютером.

Система имеет три режима работы: режим калибровки, режим обучающей игры и режим непосредственного управления компьютером. Опишем их подробнее.

*Калибровка* — это настройка системы на конкретного пользователя. Данный режим так или иначе присутствует при использовании любой системы распознавания движений глаз. В системе «Окулографический интерфейс» калибровка организована следующим образом. Пользователю показывается стимул (закрашенный круг диаметром 5 мм), резко перемещающийся с интервалом в 1 секунду в соответствии со схемой, представленной на рис. 3. На этом рисунке показана схема перемещения стимула. Он последовательно занимает восемь позиций сначала на малой окружности, потом на средней, потом на большой. После каждого перемещения стимул опять возвращается в исходное положение, в центр. Это необходи-



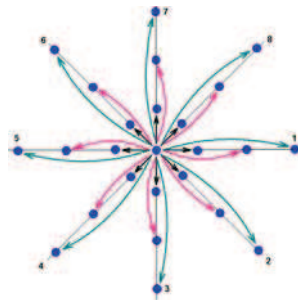


Рис. 3. Схема движения стимула при калибровке

мо, так как нас интересует, как изменяются электроокулограммы при смещении взгляда испытуемого (вслед за стимулом) на определенный угол и на определенное расстояние. Движение стимула происходит по часовой стрелке. Проводится также калибровка морганий, как монокулярных (отдельно каждым глазом), так и бинокулярных.

Режим *обучающей игры* предназначен для формирования у пользователя навыков работы с системой. Ему необходимо при помощи движений глаз поместить собственный курсор (синий круг) внутрь мишени — красного круга большего диаметра. В это время экспериментатор может корректировать параметры фильтрации сигнала. Новое положение мишени можно задать морганием одним глазом. Это позволяет пользователю тренировать не только навык перемещения курсора при помощи движения глаз, но и имитацию нажатий клавиш мыши при помощи монокулярных морганий.

В режиме *управления компьютером* система полностью заменяет компьютерную мышь. При этом курсор в каждый момент времени находится там, куда смотрит пользователь, а нажатия левой и правой клавиш мыши пользователь имитирует отчетливым и акцентированным морганием левым или правым глазом.

Кроме того, в рамках системы «Окулографический интерфейс» существует подсистема *визуализации накопленных электроокулограмм*, с помощью которой на биолого-почвенном факультете проводят исследования различных явлений и параметров окулomotorной системы человека.

### 1.3.2. Архитектура

На данный момент система реализована как экспериментальная установка с двумя мониторами — для пользователя-испытуемого и для экспериментатора. Ее архитектура представлена на рис. 4.

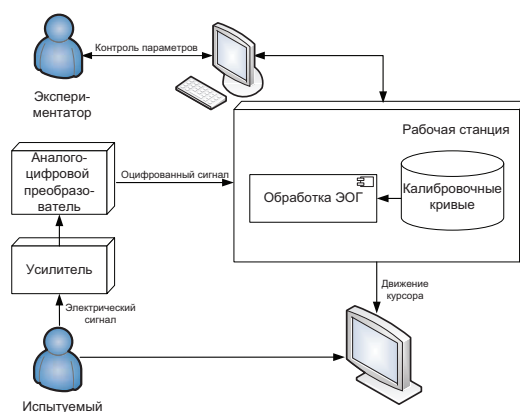


Рис. 4. Архитектура системы «Окулографический интерфейс»

Для регистрации электроокулограмм применяется 32-канальный электроэнцефалограф компании «Мицар» (Санкт-Петербург)<sup>9</sup>. Регистрируемый им электрический сигнал проходит через блок усилителей полосой пропускания 0,5–70 Гц. Далее сигнал оцифровывается 32-канальным аналого-цифровым преобразователем (АЦП) компании «L-Card» (Москва)<sup>10</sup>. При данной полосе пропускания усилителей медленные смещения взгляда, характерные для визуального слежения или поворотов головы, игнорируются автоматически, поскольку соответствуют частоте ниже 0,5 Гц. Частота дискретизации на выходе АЦП составляет 2000 Гц.

Оцифрованный сигнал поступает малыми порциями и проходит через фильтрацию компонентой «Обработка ЭОГ». При обнаруже-

<sup>9</sup><http://www.mitsar.ru/>

<sup>10</sup><http://www.lcard.ru/>

нии саккады на основании найденных при калибровке зависимостей между смещением глазного яблока и амплитудой возникающего колебания (калибровочные кривые), вычисляются величина и направление смещения взора. После этого курсор на мониторе испытуемого смещается соответствующим образом. Возможна корректировка настроек системы экспериментатором.

Кроме того, реализована отдельная подсистема для визуализации накопленных электроокулограмм и экспериментирования с ними. При использовании этой подсистемы не обязательно присутствие пользователя-испытуемого и наличие АЦП, она может быть запущена на любом компьютере.

Рассмотрим подробнее компоненту «Обработка ЭОГ», архитектура которой представлена на рис. 5.

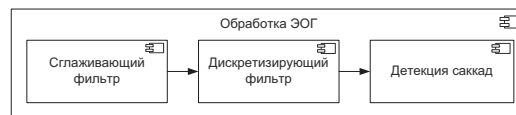


Рис. 5. Архитектура компоненты «Обработка ЭОГ»

Каждая поступившая порция сигнала обрабатывается последовательно сглаживающим фильтром, дискретизирующим фильтром и компонентой «Детекция саккад»<sup>11</sup>.

*Сглаживающий фильтр* подавляет высокочастотные помехи. В момент времени  $i$  на вход поступает сигнал, пришедший с аналого-цифрового преобразователя —  $x_i$ . Выход сглаживающего фильтра  $S_i$  определяется по формуле

$$S_i = \alpha x_i + (1 - \alpha)S_{i-1},$$

где  $\alpha$  — параметр фильтра, а в качестве  $S_0$  берется усредненное значение сигнала на некотором начальном промежутке, на котором гарантированно нет движений глаз, т. е. полезной составляющей

<sup>11</sup> Существует возможность вставлять в эту цепочку любые фильтры из уже имеющегося набора, либо определять свои. Здесь описывается наиболее употребляемая конфигурация.

сигнала. Каждый канал при данной фильтрации рассматривается отдельно.

*Дискретизирующий фильтр* принимает на вход обработанный сглаживающим фильтром сигнал и выдает ноль в случае, если саккада не обнаружена либо распознано затухание, и входной сигнал в случае обнаружения переднего фронта саккады. Данный фильтр так же, как и сглаживающий, рассматривает сигнал отдельно на каждом канале<sup>12</sup>.

*Компонента «Детекция саккад»* выполняет согласование данных о наличии и амплитуде саккад по разным каналам, и в случае наличия саккады на достаточном количестве каналов вычисляет по калибровочным кривым направление и расстояние смещения курсора на мониторе испытуемого.

### 1.3.3. Проблемы

Все пользователи, работавшие с системой «Окулографический интерфейс», сходятся во мнении, что управлять системой тяжело. Курсор часто двигается не в том направлении, что глаза, с непропорциональной амплитудой, нередко происходят ложные срабатывания. После анализа этих субъективных мнений был выделен ряд следующих проблем:

- не всегда отличает передний фронт саккады от шума;
- дает ответ о начале движения только тогда, когда оно уже завершилось, следовательно, и курсор переводится с опозданием, а если еще учесть задержку, наведенную сглаживающим фильтром, то получаем задержку ответа на действия пользователя 0,1–0,3 сек, что существенно снижает удобство работы с системой;
- не в полной мере использует знания о физиологии саккадических движений, а именно об их согласованности по каналам: например, если движение глаз происходит только в горизонтальном направлении, на каналах, отвечающих за вертикальное смещение, саккад не появится.

---

<sup>12</sup>Подробнее дискретизирующий фильтр описан в работе [2].

Кроме того, подсистема для визуализации электроокулограмм имеет существенный недостаток: она не предоставляет возможностей для сбора статистики, и поэтому статистика собирается «вручную», а правильность работы системы измеряется «на глаз» и по субъективным впечатлениям пользователей.

#### 1.3.4. Пути решения проблем

В ходе исследований физиологии окуломоторной системы человека на кафедре высшей нервной деятельности обнаружено, что перед каждой саккадой у каждого человека регистрируются короткие негативные броски потенциала — *предсаккадные пики* (см. рис. 2).

Их предполагаемая природа такова. Перескок возбуждения с клетки на клетку сопровождается так называемым постсинаптическим потенциалом на (ПСП) мембране клетки-адресата. В случае перескока с нервного окончания на мышечную клетку этот потенциал имеет специальное название — «потенциал концевой пластинки» (ПКП). Концевая пластинка — это контакт нерва и мышцы, или нервно-мышечный синапс. Этот потенциал запускает цепь событий в мышечном волокне, результатом которых и являются сокращение мышцы и, соответственно, движение глазного яблока. Данный процесс продолжается некоторое время, из-за чего само сокращение (а значит, и движение) несколько отстаёт от ПКП. Обычно ПСП и ПКП можно наблюдать только при помощи внедрённых в ткань игольчатых электродов. Однако глазные мышцы и глазодвигательные нервы имеют особые свойства по сравнению со скелетной мускулатурой, они очень мощные для своих размеров [5]. Поэтому ПКП в этой ситуации фиксируется даже при использовании накожных электродов. Его не замечали раньше из-за шума или недостаточной частоты дискретизации (ПКП имеет очень небольшую продолжительность — 10–15 мсек), а также из-за особенностей фильтрации (воспринимался как помеха).

Использование информации о предсаккадных пиках помогает в полной мере учитывать явление согласованности саккадических движений в системе «Окулографический интерфейс», избавляет детектор саккад от ложноположительных срабатываний и, кроме того, позволяет сделать вывод о факте движения глаз еще до его

начала. Именно это и является темой представленного в статье исследования<sup>13</sup>.

#### 1.4. Метод наименьших квадратов

Классическим подходом к оценке параметров по наблюдениям, осложненным шумами, является метод наименьших квадратов [3]. Пусть экспериментально получены точки  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ , и требуется аппроксимировать их прямой, т. е. найти коэффициенты  $a$  и  $b$  такие, что прямая  $y = ax + b$  наилучшим образом согласуется с опытными данными.

Пусть такая прямая найдена. Обозначим через  $\delta_i$  расстояние от опытной точки до точки на этой прямой с тем же значением по оси абсцисс. В данном случае  $\delta_i = y_i - ax_i - b$ . Чем меньше значения  $|\delta_i|$ , тем лучше подобрана прямая. В качестве характеристики точности подбора прямой можно принять сумму квадратов  $S = \sum_{i=1}^n \delta_i^2$ . Покажем, как можно подобрать прямую таким образом, чтобы  $S$  была минимальной.

В данном случае  $S = \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2$ . Условия минимума  $S$  задаются следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b) x_i = 0; \\ \frac{\partial S}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b) = 0. \end{cases}$$

Эту систему можно переписать в таком виде:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n y_i x_i = a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i; \\ \sum_{i=1}^n y_i = a \sum_{i=1}^n x_i + nb. \end{cases}$$

Теперь можно легко найти  $a$  и  $b$ , решив эту систему уравнений.

<sup>13</sup>Для снижения уровня помех и повышения скорости реакции системы на действия пользователя была также реализована биполярная фильтрация [2].

### 1.5. Коэффициент детерминации

После построения модели, приближающей экспериментальные данные, следует проверить, насколько она подходит. Для этого можно найти значение коэффициента детерминации  $R^2$ .

Пусть есть набор экспериментальных точек  $Y$  и некоторая построенная для них модель,  $X$  — вектор предсказаний, соответствующих точкам из  $Y$  и полученных по данной модели. Требуется количественно охарактеризовать близость векторов  $X$  и  $Y$ . Отклонение отдельной точки от предсказанного значения называется *остатком*. Чем меньше разброс значений остатков около предсказанных значений по отношению к общему разбросу значений, тем, очевидно, лучше прогноз. *Коэффициентом детерминации* ( $R^2$ ) называется следующее выражение [4]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (1)$$

где  $\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$ .

Значение коэффициента детерминации интерпретируется следующим образом. Если оно равно 0,4, то 40% от остаточной изменчивости могут быть объяснены, а 60% остаются необъясненными. Соответственно, это значение является индикатором степени подгонки модели к данным.

В случае метода наименьших квадратов вектором предсказаний является  $aX + b$ . Соответственно выражение (1) принимает вид

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}. \quad (2)$$

Значение данного выражения является мерой близости найденной методом наименьших квадратов прямой к экспериментальным точкам.

## 2. Алгоритм обнаружения предсаккадных пиков

Предлагаемый алгоритм проводит сравнение сигналов, полученных из каналов, с некоторым заданным шаблоном. При этом используется следующая гипотеза: соответствующие предсаккадным пикам фрагменты кривых одного и того же человека переводятся в некоторый заранее predetermined шаблон линейными преобразованиями с точностью до некоторого порогового значения. Эта гипотеза подтвердилась экспериментально после того, как данный алгоритм был реализован (подробнее о выборе шаблонов и экспериментах рассказывается в *разд. 4.2.*). В случае положительного ответа алгоритма система реагирует на ситуацию как на наличие пика.

Алгоритм принимает на вход шаблон — последовательность точек длины  $l$ , фрагмент сигнала (последние  $l$  отсчетов<sup>14</sup>), подлежащий сравнению с шаблоном, а также следующие параметры:

- промежуток допустимых значений параметра линейного преобразования  $\alpha^k$ ;
- $T$  — допустимую временную разницу между обнаружением пика на разных каналах. Данный параметр введен исходя из предположения о том, что один и тот же пик на разных каналах может появиться не одновременно, а с небольшой относительной задержкой;
- $F$  — минимальное количество каналов, на которых должен появиться пик для того, чтобы система зафиксировала наличие пика в целом;
- $d$  — порог реагирования на пик на отдельном канале.

Алгоритм работает следующим образом. Для  $k$ -го канала ( $k$  принимает значения от 1 до  $K$ , где  $K$  — количество включенных каналов, соответствующих задействованным отведениям энцефалографа) методом наименьших квадратов ищется линейное преобразование, которое переводит поступивший с канала сигнал в шаблон,

<sup>14</sup>При оцифровке аналоговый сигнал заменяется совокупностью его мгновенных значений — отсчетов. То есть отсчет — это вектор, по размерности равный количеству используемых каналов, каждый элемент которого равен значению сигнала на соответствующем канале в конкретный фиксированный момент времени.



после чего по формуле (2) считается коэффициент детерминации  $R_{k,q}^2$  — мера схожести между преобразованным сигналом и шаблоном для фрагмента с началом в момент  $q$ . В памяти хранятся вычисленные значения коэффициента детерминации за последние  $T$  моментов времени.

Таким образом, для каждого из  $K$  каналов имеются  $T$  значений коэффициента детерминации, соответствующих последним  $T$  моментам времени. Выберем наибольшее из них для каждого канала. Таким образом, мы имеем набор  $\{p_1, p_2, \dots, p_K\}$ , анализируя который получим вероятность того, что на данном фрагменте сигнала имеет место предсаккадный пик. Каждое число из имеющегося набора соответствует вероятности того, что пик есть на отдельном канале с учетом одновременного появления пиков. Найдем вероятность появления пика хотя бы на  $F$  каналах:

$$P_q = \sum_{k=F}^K \sum_{I_k \subset N} \prod_{i \in I_k} p_i \prod_{j \in N \setminus I_k} (1 - p_j),$$

где суммирование берется по всем подмножествам  $I_k$  множества  $N = \{1, 2, \dots, K\}$ , содержащим ровно  $k$  элементов.

Если полученное значение больше порога  $d$ , алгоритм выдает положительный ответ, т. е. система будет реагировать на соответствующий участок сигнала как на содержащий пик.

Теперь рассмотрим, как алгоритм на  $k$ -ом канале вычисляет близость сигнала и шаблона.

Итак, шаблон — это множество точек  $(1, t_1), (2, t_2), \dots, (l, t_l)$ . Фрагмент из  $k$ -го канала — это множество точек  $(1, s_1^k), (2, s_2^k), \dots, (l, s_l^k)$ . Найдем близость этого множества точек с шаблоном с точностью до линейного преобразования (см. основную гипотезу, сформулированную ранее). Для этого найдем линейное преобразование, минимизирующее функцию:

$$\sum_{i=1}^l (\alpha^k s_i^k + \beta^k - t_i)^2. \quad (3)$$

Дальнейшие детали поиска линейного преобразования в точности соответствуют методу наименьших квадратов (см. разд. 1.4.).

Таким образом, мы получим  $\alpha^k$  и  $\beta^k$  для данного фрагмента сигнала. Теперь оценим близость преобразованного сигнала и шаблона, для чего найдем значение коэффициента детерминации по формуле (2):

$$R_{k,q}^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\alpha^k s_i^k + \beta^k - t_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\alpha^k)^2 (s_i^k - \bar{s}^k)^2}.$$

Если  $\alpha^k$  не попадает в условленный промежуток близости шаблона и фрагмента сигнала на  $k$ -м канале, то  $R_{k,q}^2$  заменяется нулем.

Ограничения на  $\alpha^k$  необходимы для того, чтобы отсеять участки, для которых этот коэффициент отрицателен или близок к нулю, что противоречит известным данным о форме и природе предсаккадных пиков. Кроме того, контроль этого коэффициента оказался весьма полезен при проведении экспериментов специалистами-биологами в ходе апробации компоненты обнаружения предсаккадных пиков в экспериментальном окружении, в частности, для проверки гипотезы о том, что предсаккадные пики имеют одинаковую высоту для одного человека, причем для каждого — свою.

Нетрудно видеть, что сложность предложенного алгоритма составляет  $O(l + T)$ , где  $l$  — это длина шаблона, а  $T$  — максимальная временная разница между появлением пика на разных каналах. Количество каналов  $K$  в задаче распознавания движений глаз является фиксированным параметром ( $K = 5$  для текущей методики проведения эксперимента). Он может измениться, лишь когда меняется схема расположения электродов, поэтому в оценку сложности он не включен. Отметим также, что продолжительность предсаккадного пика составляет 20–30 отсчетов при частоте дискретизации 2000 Гц, используемой в задаче распознавания движений глаз, а значит, анализируя каждый отсчет, невозможно пропустить участок сигнала, содержащий пик.

### 3. Особенности реализации компоненты обнаружения предсаккадных пиков

В данном разделе пойдет речь о реализации алгоритма обнаружения предсаккадных пиков в соответствующей программной компоненте и о ее интеграции в систему «Окулографический интерфейс».

Реализованная компонента обнаружения предсаккадных пиков имеет следующую функциональность: в каждый момент времени на вход поступают значения сигнала со всех каналов, на выходе компонента выдает ответ на вопрос, есть ли предсаккадный пик на фрагменте сигнала, непосредственно предшествующем данному отсчету.

Общая архитектура системы «Окулографический интерфейс» описана в *разд. 1.3.2.* и представлена на рис. 4 и 5. На рис. 6 показано, как компонента обнаружения предсаккадных пиков встраивается в компоненту «Обработка ЭОГ».

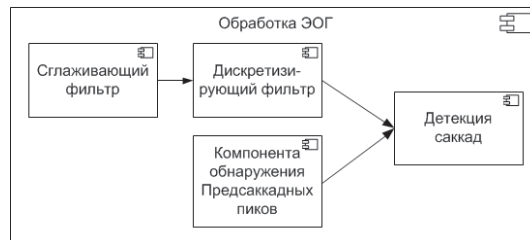


Рис. 6. Интеграция компоненты обнаружения предсаккадных пиков в систему

Результат дискретизирующего фильтра учитывается только в том случае, если с момента последнего положительного ответа от компоненты обнаружения пиков прошло не очень много времени (не больше порогового значения, выступающего в роли параметра системы). Таким образом решается проблема большого числа ложноположительных срабатываний системы. К функционально-

сти компоненты «Детекция саккад» добавилась синхронизация результатов дискретизирующего фильтра и компоненты обнаружения предсаккадных пиков.

Компонента обнаружения предсаккадных пиков реализована на языке C++ в среде C++ Builder 6. Выбор языка и среды обусловлен необходимостью соответствия средствам реализации системы «Окулографический интерфейс».

В начале данной работы предсаккадные пики могли быть обнаружены лишь экспертом-биологом на визуализированной в системе «Окулографический интерфейс» электроокулограмме, причем использовалась интуитивная и неявная информация (например, факт наличия следующей за пиком саккады), которая недоступна при обработке данных алгоритмом обнаружения предсаккадных пиков в режиме реального времени.

Система «Окулографический интерфейс» разрабатывалась в основном профессиональным биологом, она довольно хорошо спроектирована и продумана, но реализована с использованием устаревших концепций и не принятых в современной программной инженерии методов, а также довольно плохо документирована. Поэтому возникали определенные сложности в понимании архитектуры системы. Кроме того, изначально в системе использовался бинарный формат хранения электроокулограмм (так называемый eog-формат) и, соответственно, низкоуровневые небезопасные функции работы с данными. Этот формат предполагал хранение большого количества избыточной информации (например, номера начальных байтов фрагментов записи, название файла, признак того, что файл открыт и т. д.). В связи с этим был создан конвертор, преобразующий записи электроокулограмм из бинарного формата в текстовый (подробнее о нем рассказывается в *разд. 4.1.*)

Значительное неудобство при интеграции компоненты обнаружения предсаккадных пиков заключалось в том, что система не работала без специального оборудования (платы АЦП), которое было доступно только на биолого-почвенном факультете.

Сложности тестирования заключались в том, что если оставаться в рамках существующего окружения, невозможно как-либо количественно оценить эффективность работы компоненты. Это привело к необходимости создания независимого окружения и методики

проведения экспериментов для компоненты обнаружения предсаккадных пиков.

## 4. Экспериментальное окружение

Ниже пойдет речь о средстве тестирования и проведения экспериментов с компонентой обнаружения предсаккадных пиков, также реализованном в данной работе.

### 4.1. Функциональность и архитектура

Экспериментальное окружение для компоненты обнаружения предсаккадных пиков предоставляет возможность запускать компоненту с различными значениями параметров и получать численную оценку эффективности ее работы. Это используется для подбора оптимальных параметров компоненты для конкретного человека, а также для выявления зависимости параметров предсаккадных пиков от особенностей пользователей.

Экспериментальное окружение состоит из конвертора и визуализатора (рис. 7).

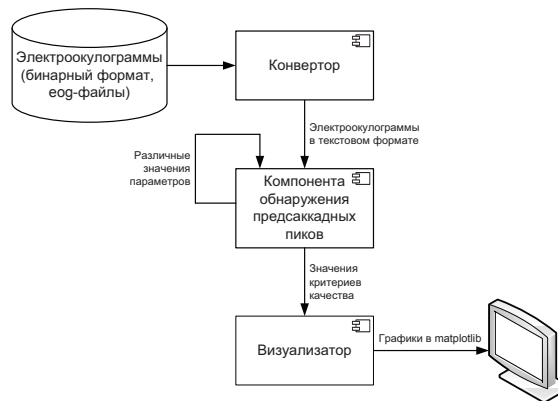


Рис. 7. Архитектура экспериментального окружения

*Конвертор* переводит электроокулографические данные из бинарного формата в текстовый, содержащий только те сведения, которые необходимы для данной задачи, а именно: номер отсчета, вектор сигнала, вектор меток. Размерность вектора сигнала равна количеству каналов, размерность вектора меток задается при записи электроокулограммы в файл системой «Окулографический интерфейс». Конвертор реализован на языке C++ в среде C++ Builder 6 в целях максимального переиспользования имеющегося кода.

По заданной (загруженной из специального файла) конфигурации *компонента обнаружения предсаккадных пиков* вызывается с разными значениями параметров, причем каждый раз считаются значения критериев качества ее работы.

*Визуализатор* получает массив значений изменявшегося параметра и массивы соответствующих значений критериев качества и по этим данным строит графики. Визуализатор реализован на языке Python (версия 2.6) с использованием библиотеки matplotlib.

#### 4.2. Методика проведения экспериментов

Изначально данное окружение использовалось для тестирования компоненты обнаружения предсаккадных пиков. Однако впоследствии оно стало активно применяться специалистами-биологами для исследования явления предсаккадного пика.

В качестве входных данных брались электроокулограммы различных людей, полученные при работе системы «Окулографический интерфейс» в режиме калибровки. Как правило, на таких записях помимо каналов, соответствующих электроокулограмме, присутствуют два дополнительных канала, значение на первом показывает, куда в данный момент двигался стимул (если он двигался), а на втором — отмечен ли этот отсчет «вручную» при просмотре записи в системе. На записях предсаккадные пики отмечались «вручную», при этом использовалась информация о том, что глаза начинают движение через 0,1–0,3 сек после перемещения стимула, что облегчало задачу нахождения пика на записи. Далее при необходимости записи проходили предварительную фильтрацию.

Компонента запускалась с различными параметрами, и считались следующие критерии эффективности ее работы:

- *доля обнаруженных пиков* — отношение количества обнаруженных пиков к количеству отмеченных на записи<sup>15</sup>;
- *количество ложных срабатываний*, т. е. ситуаций, в которых компонента обнаружения предсаккадных пиков сообщила о наличии пика, хотя он на записи не был отмечен. Полученное число делится на частоту дискретизации сигнала (в анализируемых примерах она была равна 2000 Гц).

Данное окружение использовалось для подбора оптимального шаблона для конкретного пользователя. В качестве шаблонов были рассмотрены следующие варианты:

- полусинусоида на предварительно сглаженном сигнале;
- Л-образный шаблон на несглаженном сигнале (кусочно-линейная функция);
- один из предсаккадных пиков данного пользователя.

Параметрами шаблона в первых двух случаях были высота и ширина, изменяя их, находили оптимальный для данного пользователя шаблон. В проведенных экспериментах лучше всего компонента обнаружения предсаккадных пиков работала с Л-образным шаблоном. Одним из направлений дальнейших исследований является поиск более удачных шаблонов и предварительной обработки сигнала для их использования.

## Заключение

Компонента обнаружения предсаккадных пиков, представленная в данной работе, была успешно применена сотрудниками кафедры высшей нервной деятельности и психофизиологии биологического факультета СПбГУ для исследования окуломоторной системы человека. В ходе апробации компоненты обнаружения пиков выявлено наличие *коррекционных микросаккад*, после чего специалистами-биологами была проанализирована его природа. По

<sup>15</sup>Учитывался тот факт, что после предварительной обработки сигнал может опаздывать, а значит, и предсаккадный пик будет обнаружен с задержкой. Поэтому отметку о наличии пика во входной записи можно было продлить на заданное количество отсчетов.

графикам, созданным с помощью визуализатора, найдены зависимости параметров пиков от индивидуальных особенностей пользователя: выяснилось, что примерная высота пика для каждого человека своя, причем с возрастом она уменьшается.

В качестве дальнейшей работы предполагается реализовать автоматический подбор параметров фильтрации сигнала по записям калибровки для конкретного человека, развить подсистему обработки статистики, дополнив ее пользовательским интерфейсом для удобства работы исследователей-биологов. Алгоритм распознавания предсаккадных пиков можно улучшить следующим образом: можно проделывать все вычисления не на каждом отсчете, что существенно сократит время работы алгоритма. Кроме того, имеет смысл проанализировать рассматриваемый сигнал как временной ряд. Планируется также расширить функциональность экспериментального окружения для оценки качества работы всей системы (на данный момент оно реализовано лишь для компоненты обнаружения предсаккадных пиков).

## Список литературы

- [1] Демидов А. А., Жегалло А. В. Оборудование СМТ для регистрации движений глаз: тест-драйв // Экспериментальная психология. № 1. 2008. С. 149–159.
- [2] Медведев А. М. Анализ и фильтрация электроокулограмм в задаче распознавания движений глаз. Дипломная работа. СПбГУ. 2010. 47 с.
- [3] Шор Я. Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. М.: Госэнергоиздат, 1962. 552 с.
- [4] Электронный учебник по статистике. StatSoft, Inc., Москва, 2001. <http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm>
- [5] Эрам С. Ю. Детекция движений глаз по электроокулограмме при смещениях взора. Магистерская диссертация, СПбГУ. 2007. 81 с.
- [6] Belov D. P., Eram S. Yu., Kolodyazhnyi S. F., et al. Electrooculogram Detection of Eye Movements on Gaze Displacement // Neuroscience and Behavioral Physiology. Vol. 40. N 5. May 2010. P. 583–591.
- [7] Barea R., Boquete L., Mazo M., Lopez E., Bergasa L. M. Electrooculographic Guidance of a Wheelchair Using Eye Movements Codification



- // The International Journal of Robotics Research. Vol. 22. N 7–8. July 2003. P. 641–652.
- [8] *Bates R., Instance H. O.* Why Are Eye Mice Unpopular? — A Detailed Comparison of Head and Eye Controlled Assistive Technology Pointing Devices // *Unuivercial Access in the Information Society*. 2003. P. 280–290.
- [9] *Bulling A., Roggen D., Tröster G.* Wearable Eog Goggles: Seamless Sensing and Context-awareness in Everyday Environments // *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*. Vol. 1. N 2. April 2009. P. 157–171.
- [10] *Crane H., Steele C.* Generation-V dual-Purkinje-image Eyetracker // *Applied Optics*. Vol. 24. N 4. 1985. P. 527–537.
- [11] *Ding Q., Tong K., Li G.* Development of an EOG (Electro-oculography) Based Human-Computer Interfaces // *Proceedings of the IEEE Engineering and Biology 27th Annual Conference*. Shanghai, China. September, 2005. P. 6829–6831.
- [12] *Dutchowski A. T.* A breadth-first survey of eye tracking applications // *Behavior Research Methods, Instruments and Computers (BRMIC)*. Vol. 34. N 4. November 2002. P. 455–470.
- [13] *Dutchowski A. T.* *Eye Tracking Metodology: Theory and Practice*. London: Springer-Verlag. 2007. 238 p.
- [14] ITU Gaze Group. <http://www.gazegroup.org/>
- [15] *Fkirin M. A., Badaway S., El-Sherbeny A. S.* Driving a DC Motor by Numerically Manipulated Eye Signal Captured by EOG // *The Online Journal on Electrical Engineering (OJEEE)*. Vol. 2. N 1. 2009. P. 170–173.
- [16] *Frens M. A., van der Geest J. N.* Recording Eye Movements with Video-oculography and Scleral Search Coils: a Direct Comparison of Two Methods // *Journal of Neuroscience Methods*. Vol. 114. 2002. P. 185–195.
- [17] *Glenstup A. J., Engell-Nielsen T.* *Eye Controlled Media: Present and Future State*. Bachelour's Thesis. University of Copenhagen DIKU (Institute of Computer Science). 1995. 82 p.
- [18] *Kaufman A. E., Bandopadhyay A., Shgaviv B. D.* An Eye Tracking Computer User Interface // *Virtual Reality 1993*. *Proceedings of IEEE Symposium on Research Frontiers*. 1993. P. 120–121.

- 
- [19] *Keegan J., Burke E., Condor J.* An Electrooculogram-based Binary Saccade Sequence Classification (BSSC) Technique for Augmentative Communication and Control // 31st Annual International Conference of IEEE EMBS. September 2009. P. 2604–2607.
- [20] *Majaranta P., Kari-Jouko R.* Twenty Years of Eye Typing: Systems and Design Issues // Proceedings of Eye Tracking Research and Applications. ACM. 2002. P. 15–22.
- [21] *Merchant S.* Eye Movement Research in Aviation and Commercially Available Eye Trackers Today. Eye Movement Summary — Assessing Human Visual Performance. University of Iowa, USA. 2001. [http://colletm.free.fr/archives\\_colletm/bib/Attention/FinalEyeTrackingReportAug17.pdf](http://colletm.free.fr/archives_colletm/bib/Attention/FinalEyeTrackingReportAug17.pdf)
- [22] *Smith J. D., Graham T. C. N.* Use of Eye Movements for Video Game Control // ACM International Conference Proceeding Series. Vol. 266 Proceedings of the 2006 ACM SIGCHI International conference on Advances in Computer Entertainment Technology. 2006. P. 20–28.
- [23] *Tsai J.-Z., Lee C.-K., Wu C.-M., Wu J.-J., Kao K.-P.* A Feasibility Study of an Eye-writing System Based on Electro-oculography Journal of Medical and Biological Engineering. Vol. 28. N 1. 2007. P. 39–46.