

**ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ НЕЙРО-КОМПЬЮТЕРНОГО
ИНТЕРФЕЙСА С УЧЕТОМ ПОВЕДЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА****Я. А. Туровский, С. Д. Кургалин, А. В. Максимов***Воронежский государственный университет***Поступила в редакцию 29.10.2011 г.**

Аннотация. В статье рассматривается метод увеличения скорости работы нейрокомпьютерного интерфейса, основанный на прогнозе поведенческой реакции человека. Преимущества метода – индивидуальная настройка нейрокомпьютерного интерфейса и сокращение времени распознавания и классификации феноменов энцефалограммы, обеспечивающих формирование команд для внешних устройств.

Ключевые слова: нейрокомпьютерный интерфейс, человеко-машинное взаимодействие, электроэнцефалограмма

Annotation. We analyze ways to optimize Brain-computer interface, by including on model for the forecasted human response. The method features the possibility of individual fine tuning of Brain-computer interface and improved timing for classification of signals observed in the encephalogram, which is fundamental for generating the commands bound for the exterior devices.

Keywords: Brain-computer interfaces, Human-computer interaction, electroencephalogram

ВВЕДЕНИЕ

Специфика нейро-компьютерного интерфейса (НКИ) заключается в том, что при его работе команды или сообщения, посылаемые индивидуумом во внешний мир, идут от мозга не через обычные выходные каналы – периферийные нервы и мышцы [1], а регистрируются в виде электромагнитных сигналов, формирующихся в результате активизации отдельных нейронов или нейронных ансамблей.

В общем случае взаимодействие человека и компьютера в рамках парадигмы НКИ выглядит следующим образом.

1. Желание человека достичь определённого результата приводит к изменению активности определенной части головного мозга, что проявляется в изменении волновых паттернов электроэнцефалограммы (ЭЭГ).

2. Специальный прибор регистрирует эти паттерны и передаёт их для обработки в компьютер.

3. Компьютер, используя алгоритмы анализа и классификации данных, определяет, какое именно действие необходимо совершить, и реализует его через устройство-эффе́ктор.

В настоящее время скорость и точность работы НКИ пока ещё уступают аналогичным показателям для «классических» коммуникационных устройств (клавиатуры, джойстика, мыши или тачпада). И если точность выполнения команд, обеспечиваемая рядом лучших технологий НКИ, достигает 95–99 %, то скорость передачи данных остается весьма малой и находится для большинства случаев в пределах 6–10 символов в минуту. Рекордная скорость – 60–70 символов в минуту – получена на устройствах, принадлежность которых к технологии НКИ подвергается сомнению [2].

Таким образом, существенное увеличение скорости работы систем НКИ при сохранении или, возможно, незначительном снижении точности является весьма актуальной задачей, решение которой имеет не только теоретическое, но и большое практическое значение и может обеспечить создание в будущем новых типов НКИ.

Целью настоящей работы является создание метода увеличения скорости работы НКИ с использованием технологии «опережающего отражения» [3], основанного на прогнозе развития событий, непосредственно связанных с деятельностью человека.

МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ НКИ

Анализ существующей проблемы недостаточной скорости работы НКИ дает основание сделать вывод, что её решение будет принципиальным образом связано с входящей в НКИ системой принятия решения на совершение определенного действия. Например, когда человек поднимает предмет, его мозг выполняет ряд параллельных и последовательных задач, о которых человек не отдаёт себе осознанного отчета. При этом одна из систем обеспечивает сознательную реакцию, вторая – загружает модели движения конечностей в исполнительные нейроны, третья – обеспечивает изменение тонуса мышц, четвёртая – осуществляет координацию работы разных групп мышц и нейронов и т.д. Очевидно, что человеком осознаются действия только первой из указанных систем (состоящей, конечно, из ряда подсистем). Появление новых каналов коммуникаций, далёких во многих случаях от совершенства, приводит к тому, что все действия человек вынужден осуществлять осознано (примерно так же, как это происходит при освоении нового навыка). В итоге, современная система НКИ, по сути, формирует ситуацию, когда все управляющие команды вынужден генерировать сам человек, пользуясь при этом медленными и недостаточно эффективными каналами связи. Всё сказанное выше приводит к новой идее – передать часть функций человеко-машинного интерфейса от человека компьютеру. Это будет аналогией того, что большая часть команд, поступающих из мозга на осуществление движения человека, связана с неосознаваемыми механизмами его поведения.

Решение указанной выше задачи может быть достигнуто введением в схему архитектуры НКИ дополнительного модуля, главной частью которого является предварительно сформированный и отлаженный классификатор состояний головного мозга, который должен обеспечивать прогноз поведения человека в каждой конкретной ситуации.

Рассмотрим теперь пример алгоритма, который может обеспечить ускорение работы НКИ в соответствии с заявленными выше принципами.

Пусть в ходе работы НКИ появляется ряд несовместных событий: S_1, S_2, S_3, S_4 . Это могут быть, например, четыре разные команды на движение робота-тележки, на выполнение определённых действий биопротезом или же ко-

манды управления компьютером. Вероятность генерации пользователем любой из этих команд традиционно принимается одинаковой [4]:

$$P_1(S_1) = P_2(S_2) = P_3(S_3) = P_4(S_4), \quad (1)$$

где P_i ($i = 1, \dots, 4$) – вероятность наступления события S_i [3]. Есть такие ситуации, когда это равенство верно, однако в общем случае такое предположение является ошибочным. Действительно, при совершении определённых действий (генерации команд) выполняются последовательные операции, причем вероятность последующей операции в цепи таких операций оказывается значительно выше, чем для операции, не входящей в данную последовательность. В физиологии это называется «динамическим стереотипом» [5], а на бытовом уровне это можно увидеть, например, в ежедневно повторяемой человеком одной и той же последовательности действий. Таким образом, в общем случае, команды, следующие за командой S_1 , могут быть сгенерированы с разной вероятностью, а, следовательно, и обеспечить разную вероятность реализации стратегии поведения пользователя, которую можно будет рассматривать как эквивалент физиологического термина «квант поведения», введённого К. В. Судаковым [6]. Эти вероятности могут быть получены и эмпирически, исходя из анализа индивидуальных поведенческих реакций человека.

Современные неинвазивные НКИ (то есть не применяющие технологии, использующие вживление электродов в мозг) можно разделить по принципу работы на две группы. Одна из них использует методы, основанные на регистрации определённых паттернов ЭЭГ как фоновой активности, так и связанной с определённым стимулом. Другая группа НКИ основана на методах, реализующих технологии оценки вызванных потенциалов, связанных с анализом внимания пользователя. Именно развитие методов в этой группе НКИ привело к созданию двух наиболее популярных в настоящее время технологий: технологии, основанной на волне P300, и технологии SSVEP (Steady-State Visual Evoked Potentials – вызванных зрительных потенциалов устойчивого состояния) [7].

Рассмотрим, с учетом ошибок в распознавании нужной команды, потенциальные затраты времени для НКИ обозначенных двух типов. В случае если проводится анализ фоновой активности ЭЭГ, необходимо сохранять паттерн мозговой активности в течение определённого

времени [1,4]. Таким образом, можно ввести параметр t_r как время, в течение которого сохранение определённых паттернов мозговой активности послужит сигналом для программно-аппаратного комплекса НКИ на получение конкретной команды. Общий вид подобной зависимости представлен на рис. 1. Нетрудно заметить, что с ростом времени, требуемого системе НКИ для принятия решения о наличии команды, доля ошибок в идентификации паттерна ЭЭГ, несущего информацию о команде для НКИ, будет уменьшаться, что вполне логично, если принять во внимание, что, помимо действий, направленных на формирование приказа для устройства-эффектора, нейронные ансамбли заняты обработкой «текущей» информации, что приводит к изменению электрогенеза мозга, и, следовательно, к возможности ложного срабатывания классификатора. По этой же причине длительное сохранение определённого паттерна крайне сложно, и, следовательно, при превышении некоторого интервала времени ошибка идентификации паттерна ЭЭГ снова будет расти.

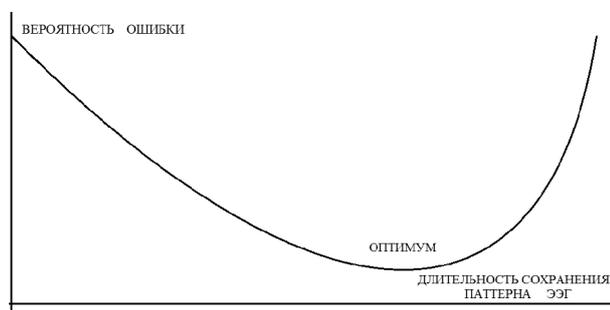


Рис. 1. Зависимость вероятности ошибки идентификации паттерна ЭЭГ, несущего информацию о команде для НКИ, от длительности существования паттерна ЭЭГ, несущего команды для программно-аппаратной части НКИ. Виден оптимум, при котором вероятность ошибки идентификации паттерна минимальна

Если используется технология вызванных потенциалов (ВП), то для выделения необходимого сигнала, являющегося командой, нужно выполнить ряд (иногда до 100–300) повторений стимула [8]. Поскольку амплитуда ВП много меньше амплитуды фоновой ЭЭГ [8], то необходимо прибегнуть к когерентному накоплению сигнала, следующего за группой стимулов. Чем больше накоплений, тем лучшим будет отношение сигнал/шум. Имеющаяся зависимость яв-

ляется квадратичной: для улучшения отношения сигнал/шум в 2 раза необходимо увеличить число суммаций в 4 раза и т.д. Отсюда очевидна и прямая зависимость между точностью идентификации нужной волны вызванного потенциала и числа суммаций. В тоже время, рост числа суммаций приводит к тому, что искомый вызванный потенциал может с течением времени изменить свою форму, амплитуду или латентное время, что негативно скажется на результатах его использования.

Сказанное выше требует более гибкого подхода к идентификации любых паттернов ЭЭГ, обеспечивающего достаточно хорошую адаптацию программно-аппаратного комплекса НКИ к индивидуальным реакциям пользователя.

Одним из вариантов осуществления такой адаптации является добавление в схему НКИ модели прогноза поведения человека.

Существенно сократить время на идентификацию командного паттерна можно, применив алгоритм, в котором количество суммаций ЭЭГ при выявлении вызванных потенциалов N_s в случае, если технология НКИ использует ВП, или время t_r , необходимое для произвольного или непроизвольного удержания паттерна фоновой активности ЭЭГ, будут тем меньше, чем больше вероятность генерации человеком соответствующей команды в текущей ситуации.

Рассмотрим детально данный подход.

Пусть эмпирически, исходя из индивидуальных поведенческих стратегий человека, получено соотношение, отражающее вероятность наступления тех или иных реакций человека в ответ на определенные стимулы:

$$P_1 = b_2 P_2 = b_3 P_3 = b_4 P_4, \quad (2)$$

где b_j – эмпирически полученный коэффициент вероятности наступления j -го события ($j = 1, \dots, 4$).

Представим набор команд, генерируемых человеком с целью достижения, например, курсором определённой точки на экране монитора, в виде ориентированного графа (рис. 2).

Как видно из рис. 2, перемещение по вершинам орграфа «сверху вниз» возможно по-разному, достигнуть полезного результата (терминальных вершин) можно с использованием различных комбинаций стратегий. Отметим, что вероятность перемещения из вершины (то есть из состояния) А по дуге АД в вершину (состояние) D выше, чем по другим возможным траекториям.

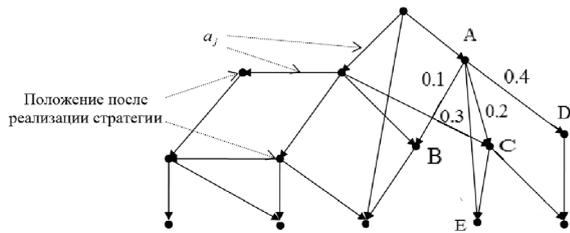


Рис. 2. Орграф стратегий a_j пользователя. Вершины – состояния до или после завершения стратегии a_j , дуги – стратегии a_j . Числами рядом с дугами показаны вероятности реализации разных стратегий пользователя из состояния А

Из рис. 2 видно, что используя эмпирические вероятности наступления различных реакций пользователя, можно обеспечить определение выбора поведенческих стратегий пользователя, отличных от случайного. Действительно, применяя в классификаторе НКИ случайный выбор любой из траекторий с вероятностью, равной эмпирической вероятности выбора пользователя, получим, например, для траектории AD на рис.2 вероятность правильного решения – в 16% случаев, тем временем, как при равновероятном выборе траекторий – только в 10% случаев.

Таким образом, вероятность принятия правильного решения на переход в другое состояние (перемещение по каждой дуге орграфа) в означенном примере будет представлять собой произведение вероятности, с которой человек самостоятельно выбирает определенную траекторию достижения цели, на вероятность идентификации данной команды программно-аппаратным комплексом НКИ.

Отметим, что для традиционной реализации НКИ эта вероятность для всех траекторий равна. Так как человек имеет свои предпочтения для тех или иных поведенческих реакций, то, очевидно, можно уменьшить время, необходимое для выявления в текущей ситуации высоковероятной команды, чтобы, в итоге, вероятности реализации всех команд пользователя для устройств-эффекторов через НКИ были одинаковыми.

Действительно, если НКИ, находясь в состоянии А орграфа стратегий (см. рис.2), с наибольшей вероятностью должен подать команду для устройства-эффектора и переместиться,

тем самым, по дуге AD в состояние D, то должно потребоваться меньше времени на идентификацию паттерна мозговой активности, соответствующего команде с высокой вероятностью, чем на идентификацию команды, вероятность которой низка.

Таким образом, виден резерв сокращения времени работы нейрокомпьютерного интерфейса, основанного на анализе мозговых паттернов.

В случае если функция ошибки классификатора НКИ линейно зависит от времени генерации нужного паттерна, можно получить формулу для оценки сокращения времени, необходимого для генерации паттерна:

$$t_j = t_1 / b_j, \quad (3)$$

где t_j – время для идентификации j -го паттерна, причём t_1 – время, которое нужно для идентификации самого длительного паттерна мозговой активности.

Рассмотрим аналогичную зависимость для случая применения в НКИ вызванных потенциалов, приняв во внимание, что качество выделения полезного сигнала зависит от соотношения сигнал/шум:

$$N_j = N_1 b_j^2, \quad (4)$$

где N_j – количество реализаций ЭЭГ в ответ на заданные стимулы для получения вызванного потенциала, и, следовательно, для генерации команды, а N_1 – количество реализаций ЭЭГ в ответ на заданные стимулы для получения вызванного потенциала с минимальной вероятностью реализации среди всех, используемых в НКИ.

Результатом применения изложенного выше метода будет существенное уменьшение времени, необходимого НКИ для принятия решения об осуществлении любого действия, вероятность выполнения которого со стороны пользователя высока. И, наоборот, событие, вероятность наступления которого мала, и, как следствие, велик риск ошибки в работе классификатора состояний головного мозга, входящего в систему НКИ, потребует большего по сравнению с высоковероятным событием накопления данных для формирования команды на любое действие.

Поскольку поведение каждого человека имеет свои индивидуальные особенности, то и коэффициенты, изменяющие время генерации определённого паттерна или накопления реа-

лизаций ЭЭГ, тоже будут индивидуальными, обеспечивая тонкую настройку НКИ применительно к конкретному пользователю.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье предложен метод оптимизации затрат времени при работе человека с нейрокомпьютерным интерфейсом. Он основан на введении в систему НКИ нового модуля, обеспечивающего прогноз поведенческих реакций человека, и осуществлении гибкой и адаптивной его настройки. Исходя из индивидуальных поведенческих реакций человека, изменяются параметры классификации команд, поступающих посредством ЭЭГ в систему НКИ. Эти изменения обеспечивают снижение времени на классификацию высоковероятных реакций пользователя, что дает выигрыш во времени при распознавании и классификации феноменов ЭЭГ, обеспечивающих формирование команд для внешних устройств.

Преимуществами предложенного метода по сравнению с другими являются, в первую очередь, индивидуальная адаптивность НКИ и, во вторую, сокращение времени распознавания паттернов ЭЭГ, используемых при реализации данной технологии.

Туровский Ярослав Александрович – кандидат медицинских наук, доцент кафедры цифровых технологий, руководитель лаборатории информационных технологий в медицине факультета компьютерных наук; тел.: (473) 2-208-384, e-mail: yaroslav_turovsk@mail.ru

Кургалин Сергей Дмитриевич – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой цифровых технологий факультета компьютерных наук; тел.: (473) 2-208-384, e-mail: kurgalin@bk.ru

Максимов Алексей Владимирович – аспирант кафедры цифровых технологий факультета компьютерных наук; тел.: (473) 2-208-384, e-mail: suggestor@inbox.ru

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wolpaw J.R.* Control of a twodimensional movement signal by a noninvasive brain-computer interface in humans / J. R. Wolpaw, D. J. McFarland // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. – 2004. – V. 101(51). – P. 17849–17854.
2. *Gao X.* A BCI-Based Environmental Controller for the Motion- Disabled / X. Gao, D. Xu, M. Cheng [et al.] // IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. – 2003. – V. 11, № 2. – P. 137–140.
3. *Основы психофизиологии: Учебник* / Отв. ред. Ю. И. Александров. – М.: ИНФРА-М, 1997. – 349 с.
4. *Anderson C.* Classification of EEG Signals from Four Subjects During Five Mental Tasks // C. Anderson, Z. Sijercic / Solving Engineering Problems with Neural Networks: Proceedings of the Conference on Engineering Applications in Neural Networks (EANN'96). – 1996. – P. 407–414.
5. *Физиология человека* / Под ред. В. М. Смирнова. – М.: Медицина, 2002. – 608 с.
6. *Судаков К.В.* Общая теория функциональных систем. – М.: Медицина, 1984. – 224 с.
7. *Ding J.* Attentional modulation of SSVEP power depends on the network tagged by the flicker frequency / J. Ding, G. Sperling, R. Srinivasan // Cereb Cortex. Author Manuscript. – 2006. V.16(7). – P. 1016–1029.
8. *Гнездицкий В.В.* Вызванные потенциалы мозга в клинической практике. – М.: Медпресс, 2003. – 264 с.

Turovsky Yaroslav Aleksandrovich – Candidate of Medical Science, Associate Professor of the Digital Technologies Department, Head of the Digital Medical Technologies Laboratory of Computer Science Faculty; tel.: (473) 2-208-384, e-mail: yaroslav_turovsk@mail.ru

Kurgalin Sergey Dmitrievich – Doctor of Physical and Mathematical Science, Head of the Digital Technologies Department of Computer Science Faculty; tel.: (473) 2-208-384, e-mail: kurgalin@bk.ru

Maksimov Aleksey Vladimirovich – Graduate Student of the Digital Technologies Department of Computer Science Faculty; tel.: (473) 2-208-384, e-mail: suggestor@inbox.ru