

РАЗРАБОТКА ОЦЕНОЧНОЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ ИНТЕРФЕЙСА ЧЕЛОВЕК-КОМПЬЮТЕР НА ОСНОВЕ ПОНЯТИЯ «ЭМОЦИЙ» ИНТЕРФЕЙСА

Я. А. Туровский, С. В. Борзунов, А. А. Вахтин

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 20.10.2017 г.

Аннотация. Разработана модель «эмоционального» искусственного интеллекта применительно к задачам работы интерфейса мозг-компьютер. Показано, что уровень «эмоций» интерфейса определяется как сумма двух слагаемых, первое из которых связано с историей состояния пользователя, записываемой в ходе текущего сеанса, второе формируется на основе данных о технической неисправности функциональных узлов самого интерфейса.

Ключевые слова: человеко-машинный интерфейс, вариабельность сердечного ритма, эмоционально-зависимый интерфейс, интерфейс мозг-компьютер.

Annotation. The model of emotional artificial intelligence applied to the problems of interface brain-computer is developed. It is shown that the “emotion” level of interface is defined as the sum of two terms, the first of which is connected with the history state of the user that is captured during the current session, the second is based on data on technical malfunctions of the functional nodes of the interface.

Keywords: human-machine interface, heart rate variability, emotionally-dependent interface, brain-computer interface.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на разработку и совершенствование интерфейсов человек-компьютер, включая перспективные нейрокомпьютерные интерфейсы мозг-компьютер (НКИ-ИМК), направлено внимание многих групп исследователей как в нашей стране, так и за рубежом [1–3]. Одним из важнейших показателей успешности интерфейса является скорость его работы, тесно связанная с показателем точности распознавания программно-аппаратной частью интерфейса сообщаемых пользователем команд. Очевидно, что наряду с совершенствованием аппаратных решений в задачах интерфейсов, совершенствованием алгоритмов обработки сигналов, генерируемых мозгом, и несущих информацию о командах, для самообучаемых интерфейсов важной информацией являются

показатели успешности или неуспешности распознавания команд, генерируемых пользователем, являющиеся входными данными для системы, контролирующей работу интерфейса. Таким образом использование НКИ-ИМК информации о достижении пользователем желаемых целей открывает новые возможности для улучшения качества взаимодействия человек-компьютер.

Очевидно, что подобная информация должна быть легко регистрируемой, и достаточно точно верифицируемой. В противном случае неточность распознавания как команд ИМК, так и данных с контролирующей системы может сделать невозможным работу интерфейса. Одним из таких показателей успешности или, наоборот, неуспешности работы интерфейса могут выступать данные об эмоциональном состоянии пользователя.

Целью работы является разработка модели «эмоционального» искусственного интеллекта применительно к задачам работы интерфейса мозг-компьютер.

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ «ЭМОЦИЙ» ИНТЕРФЕЙСА ЧЕЛОВЕК-КОМПЬЮТЕР

Одной из ключевых задач, возникающих при проектировании интерфейса, является выбор алгоритмов обработки сигналов, поступающих с мозга. Одним из вариантов является динамический выбор, когда алгоритмы из имеющегося набора выбирает не проектировщик, а программно-аппаратная часть интерфейса на основе тех или иных способов принятия решения [4].

При таком подходе работа интерфейса человек-компьютер определяется множеством стратегий программно-аппаратного комплекса (ПАК), т. е. последовательностей применения набора алгоритмов распознавания. Обозначим это множество через $\{L_j\}$, где $j = 1, 2, \dots, N$. Как показано в [5], работу интерфейса человек-компьютер можно представить функцией вклада $\Xi(L_j)$ каждой стратегии L_j , реализуемой во время функционирования программно-аппаратного комплекса. Данная функция определяется с помощью параметров, связанных с вариацией сердечного ритма (ВСР) пользователя, как показателя отражающее его стресс-состояние, в т. ч. и эмоциональный компонент, а именно σ_m – фоновые значения среднеквадратического отклонения ВСР, полученные в ходе обучения системы и пропорциональных спектре мощности сигнала, и $\sigma_{L_j(\Delta t_n)}$ – текущие значения отклонения ВСР в промежутке времени Δt_n :

$$\Xi(L_j) = \sum_0^{n_{\max}} \left| \sigma_m - \sigma_{L_j(\Delta t_n)} \right| / \sum_0^{n_{\max}} \Delta t_n, \quad (1)$$

где n – порядковый номер реализации стратегии L_j , продолжающейся за время Δt_n , а n_{\max} – максимальное количество реализаций стратегии ПАК. Функция $\Xi(L_j)$ отображает множество стратегий $\{L_j\}$ на множество неотрицательных вещественных чисел согласно правилу: вычисляется сумма отклонений в ходе выполнения этой стратегии ПАК, взвешенная на время реализации данной стратегии.

В рамках данного подхода для разных состояний пользователя применяются различные стратегии интерфейса. В определении (1)

учитываются значения разностей $\left| \sigma_m - \sigma_{L_j(\Delta t_n)} \right|$ в период времени действия одной и стратегий, а именно L_j . Перейдем к рассмотрению более общего случая, при котором для принятия решения о реализации очередной стратегии анализируется история работы всех стратегий, начиная с момента времени $t = 0$, с учетом порядка их изменения в процессе функционирования интерфейса. Например, следует учитывать, какая стратегия L_{k_s} предшествовала L_j в истории, или, другими словами, важен порядок команд в цепочке [6]. Функция, определяющая выбор стратегий работы интерфейса, определена на множестве всевозможных последовательностей элементов, принадлежащих $\{L_j\}$, имеет вид:

$$\Xi^*(L_i) = \sum_{k_1, \dots, k_s, k_r, \dots} \Xi(L_{k_s}) \delta(k_r, k_s), \quad (2)$$

где сумма берется по номерам стратегий ПАК, и множитель $\delta(k_r, k_s) = 1$ тогда и только тогда, когда стратегия L_{k_r} непосредственно предшествует стратегии L_{k_s} в истории работы интерфейса, и $\delta(k_r, k_s) = 0$ в противном случае. Функция Ξ^* , в отличие от Ξ , учитывает историю принятия стратегий и принимает минимальное по модулю значение при самой успешной с точки зрения точности работы интерфейса последовательности выбора стратегий ПАК.

Введем в рассмотрение понятие «эмоции» интерфейса человек-компьютер. Согласно информационной модели В. М. Смирнова [7–9], эмоции человека – это функция, принимающая вещественные значения, и определяемая следующим образом:

$$\mathcal{E} = f \left[P, (I_n - I_c), \dots \right], \quad (3)$$

где \mathcal{E} – эмоция; P – сила и качество актуальной потребности; I_n – информация о средствах, прогностически необходимых для удовлетворения потребности; I_c – информация о средствах, которыми располагает субъект в текущий момент; $(I_n - I_c)$ – оценка вероятности (возможности) удовлетворения потребности на основе врожденного и онтогенетического опыта. В рамках данной модели эмоции есть мера оценки расхождения ожидаемого и полученного результата,

что позволяет расширить понятие эмоций на программно-аппаратные решения, рассмотрев функцию указанного вида. Заметим, что под термином «информация» в формуле (3), как и в [7], подразумевается изменение вероятности достижения цели (удовлетворения потребности) благодаря получению данного конкретного сообщения. Известно, что определение (3) неоднократно подвергалась обоснованной критике [10], поэтому мы воспользуемся ею только в качестве основы для создания модифицированного варианта модели, который обеспечит нам необходимые условия для корректного моделирования исследуемого процесса.

Обобщим понятие эмоций человека для описания работы интерфейса. Предположим, что за формирование «эмоций» интерфейса отвечают два канала – эмоциональный уровень пользователя и наличие отказов в аппаратной или программной частях интерфейса. В связи с этим уровень «эмоций» интерфейса представим как сумму

$$\mathcal{E}_{\text{интерф.}}(t) = \mathcal{E}_{\text{интерф.}}^{(1)}(t) + \mathcal{E}_{\text{интерф.}}^{(2)}(t), \quad (4)$$

причем первое слагаемое зависит от состояния человека, второе – от наличия поломок программно-аппаратной части. Выразим $\mathcal{E}_{\text{интерф.}}^{(1)}(t)$ в терминах функции вклада $\Xi(L_j)$ каждой стратегии:

$$\mathcal{E}_{\text{интерф.}}^{(1)}(t) \sim -\left| \Xi(L_i) - \left| \sigma_m - \sigma_{L_j(\Delta t_n)} \right| \right|, \quad (5)$$

что отражает факт зависимости эмоций человека от абсолютного значения разности между ожидаемым результатом работы и ре-

зультатом, полученным в действительности. В (5) принято во внимание, что интерфейс в нашей модели не испытывает положительных эмоций.

Второе слагаемое $\mathcal{E}_{\text{интерф.}}^{(2)}$ связано с надежностью функциональных элементов F_k , $k = 1, 2, \dots, f$, образующих интерфейс. Во время работы интерфейса возможны случаи, когда какой-либо элемент F_k прекратит свое функционирование вследствие программно-аппаратного отказа. Тогда «эмоции» интерфейса зависят от возможности или невозможности замены F_k другим элементом F_j , иными словами, от дублирования функциональных элементов. Чем меньше выражена возможность замены F_k другим элементом, не меняя стратегии ПАК, тем большее влияние имеет факт поломки на $\mathcal{E}_{\text{интерф.}}^{(2)}$. Заметим, что факт отказа при наличии свойства самодиагностики у интерфейса приводит к изменению реализуемой стратегии. Информационные потоки, возникающие в процессе работы интерфейса человек-компьютер, схематично представлены на рис. 1.

Введем в рассмотрение матрицу M зависимости возможностей реализации стратегий от функциональных элементов, составляющих аппаратную часть интерфейса. Это матрица размера $f \cdot N$, элементы которой определим согласно правилу:

$M_{ij} = 1 / (B + 1)$, если функциональный элемент F_i необходим для работы стратегии L_j и имеются B функциональных элементов, дублирующих F_i для этой стратегии;

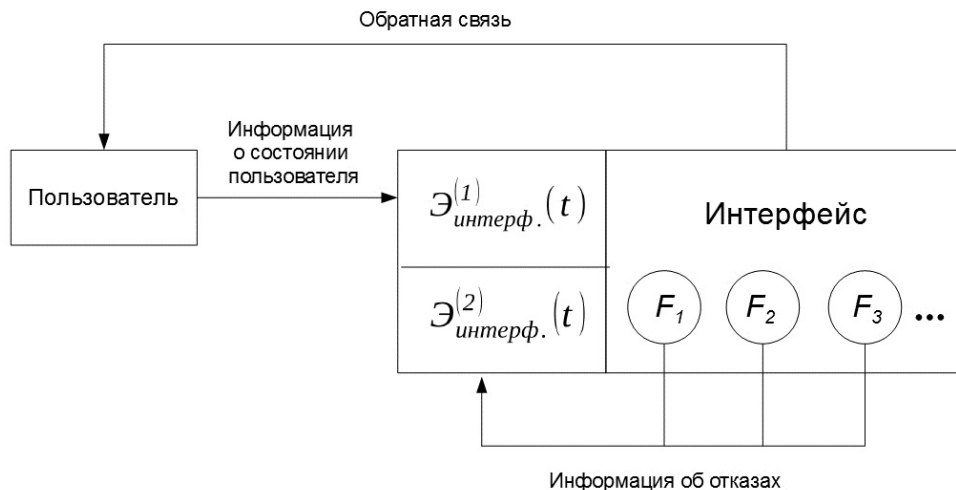


Рис. 1. Информационные потоки в интерфейсе человек-компьютер

$M_{ij} = 1$, если функциональный элемент F_i необходим для работы стратегии L_j и для него нет дублирующих элементов,

$M_{ij} = 0$, в противном случае.

Для пояснения понятия матрицы зависимости возможностей реализации стратегий приведем два примера.

Пример 1. Пусть аппаратную часть интерфейса образуют три элемента F_1 , F_2 и F_3 . При этом ПАК реализует четыре стратегии L_{1-4} , причем выполняются следующие условия: 1) элементы F_1 и F_2 необходимы для всех стратегий и могут дублировать друг друга; 2) элемент F_3 необходим для стратегий L_3 и L_4 , и для него нет дублирующих элементов. Тогда матрица зависимости возможностей реализации стратегий принимает вид:

$$M_{ij} = \begin{pmatrix} 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 \\ 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Пример 2. Как и в предыдущем примере, аппаратная часть интерфейса образована тремя элементами F_1 , F_2 и F_3 , и ПАК реализует четыре стратегии L_{1-4} . Выполняются следующие условия: 1) элементы F_1 и F_2 необходимы для всех стратегий; 2) элемент F_3 необходим для стратегий L_3 и L_4 . Пусть, в отличие от предыдущего примера, отсутствуют возможности для дублирования элементов. Тогда матрица зависимости возможностей реализации стратегий имеет следующий вид:

$$M_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

В общем случае с помощью элементов матрицы M можно вычислить величину $\mathcal{E}_{интерф.}^{(2)}$:

$$\mathcal{E}_{интерф.}^{(2)} = -\sum_j \sum_i M_{ij}^2, \quad (8)$$

где сумма по переменной j соответствует последовательности выбираемых стратегий, а сумма по переменной i^* берется по номерам вышедших из строя функциональных элементов. Квадратичная зависимость уровня эмоций $\mathcal{E}_{интерф.}^{(2)}$ от величин M_{ij} характеризует нелинейное увеличение отрицательных «эмо-

ций» (по модулю) при невозможности изменения стратегии, направленной на достижение цели в случае отказов элементов ПАК.

В частности, в рассмотренном выше примере 1 при отказе элементов F_1 и F_3 для последовательности стратегий $L_1 - L_2 - L_3 - L_4 - L_1$ получаем вклад в уровень эмоций за счет дисфункционационирования составных частей ПАК, равный

$$\mathcal{E}_{интерф.}^{(2)} = -(5 \cdot (0,5)^2 + 2 \cdot 1) = -3,25. \quad (9)$$

В примере 2 при отказе тех же элементов F_1 и F_3 для последовательности стратегий $L_1 - L_2 - L_3 - L_4 - L_1$ получаем вклад в уровень эмоций за счет дисфункционационирования составных частей ПАК, равный

$$\mathcal{E}_{интерф.}^{(2)} = -(5 \cdot 1 + 2 \cdot 1) = -7. \quad (9)$$

В итоге, формулы (5) и (8) дают возможность на основе сформулированных предположений оценить уровень «эмоций» интерфейса на основе полученной информации о состоянии пользователя и данных о технической неисправности функциональных узлов самого интерфейса.

На рис. 2 представлена блок-схема алгоритма работы ПАК интерфейса человек-компьютер. Как видно из рисунка, в процессе взаимодействия интерфейса с пользователем происходит накопление информации о ВСП человека, а также о состоянии самого интерфейса. С учетом этих данных происходит вычисления уровня эмоций, и, далее, ПАК принимает решение о смене стратегии распознавания сигналов или о сохранении текущей стратегии.

Кратко рассмотрим возможности программной реализации данного алгоритма. Выбор стратегии на первоначальном шаге работы алгоритма определяется детерминированным способом, однако в процессе функционирования интерфейса в результате оценки уровня эмоций $\mathcal{E}_{интерф.}(t)$ происходит выбор новой, очередной стратегии (или сохранение старой). Поскольку слагаемые, составляющие сумму $\mathcal{E}_{интерф.}(t) = \mathcal{E}_{интерф.}^{(1)}(t) + \mathcal{E}_{интерф.}^{(2)}(t)$, являются независимыми по входным данным, то процесс «Вычисление $\mathcal{E}_{интерф.}(t)$ » можно выполнить в параллельном режиме. Действительно, рас-

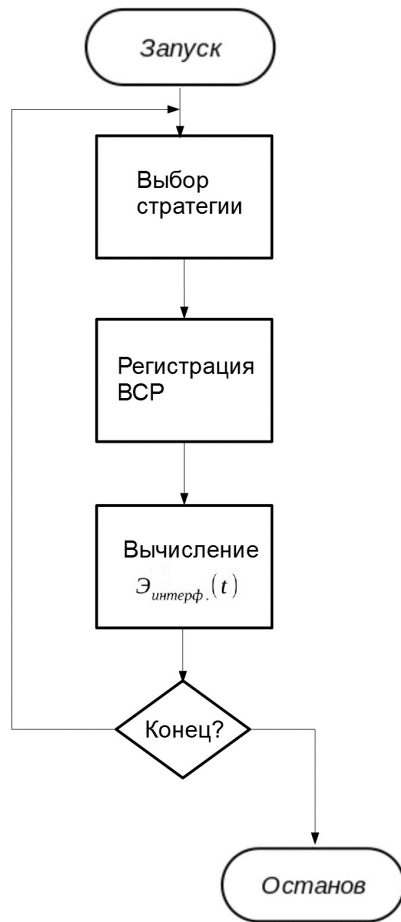


Рис. 2. Блок-схема алгоритма работы программно-аппаратного комплекса

чет каждого из слагаемых в (4) можно осуществить в отдельном параллельном потоке, или, как еще говорят, в отдельной параллельной нити (thread) в вычислительной системе с общей памятью. Более того, определение ожидаемого уровня эмоций $\Xi(L_i)$ также допускает такое распараллеливание с достаточно высоким показателем ускорения вычислений, в первом приближении пропорциональным в силу закона Амдала количеству исполняющихся нитей в компьютерной системе [11]. Таким образом, применение методов параллельного программирования позволяет проводить вычисления в режиме online и значительно уменьшить время, затрачиваемое на программную обработку сигнала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлено обобщение понятия «эмоций» для интерфейса человек-компьютер и применение этого понятия для совершенствования существующих каналов двухсторонней коммуникации. В качестве меры, отражающей успешность применения той или иной стратегии, выбраны «эмоции» интерфейса, определяемые с учетом полной истории его работы в рамках данного сеанса, и учитывающие непроизвольно управляемый сигнал пользователя – вариацию сердечного ритма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schalk G. BCI2000: A general-purpose brain-computer interface (BCI) system / G. Schalk, D. J. McFarland, T. Hinterberger [et al.] // IEEE Transactions On Biomedical Engineering. – 2004. – V. 51. – P. 10341043.
2. Nicolas-Alonso L. F. Brain Computer Interfaces, a Review / L. F. Nicolas-Alonso, J. Gomez-Gil // Sensors (Basel). – 2012. – V. 12(2). – P. 1211–1279.
3. Туровский Я. А. Анализ движения глаз человека при управлении самоходным шасси с использованием системы видеоокулографического интерфейса / Я. А. Туровский, С. Д. Кургалин, А. В. Алексеев // Сенсорные системы. – 2017. – № 1. – С. 51–58.
4. Туровский Я. А. Моделирование нейрокомпьютерного интерфейса на основе активной парадигмы / Я. А. Туровский, С. Д. Кургалин, А. В. Максимов // Системы управления и информационные технологии. – 2012. – Т. 47. – № 1. – С. 99–103.
5. Туровский Я. А. Дополнительный канал для оценки эмоциональной динамики человека при работе с нейрокомпьютерным и окулографическим интерфейсами / Я. А. Туровский, С. В. Борзунов, А. А. Вахтин // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2017. – № 6. – С. 17–23.
6. Туровский Я. А. Оценка скорости работы нейрокомпьютерного интерфейса, реализованного с использованием гибридного

интеллекта / Я. А. Туровский, С. Д. Кургалин, С. В. Борзунов // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2015. – № 3. – С. 61–70.

7. *Симонов П. В.* Эмоциональный мозг / П. В. Симонов. – М. : Наука, 1981. – 215 с.

8. *Minsky M.* The Emotion Machine : Commonsense Thinking, Artificial Intelligence, and the Future of the Human Mind / M. Minsky. – New York : Simon & Schuster, 2006. – 390 p.

9. *Picard R. W.* Affective computing / R. W. Picard. – Cambridge : MIT Press. – 2000. – 276 p.

Туровский Я. А. – канд. мед. наук, доцент, зав. лабораторией медицинской кибернетики, кафедра цифровых технологий, факультет компьютерных наук, Воронежский государственный университет.

E-mail: yaroslav_turovsk@mail.ru

Борзунов С. В. – канд. физ.-мат. наук, доцент, кафедра цифровых технологий, факультет компьютерных наук, Воронежский государственный университет.

E-mail: sborzunov@gmail.com

Вахтин А. А. – канд. физ.-мат. наук, доцент, вед. программист, лаборатория медицинской кибернетики, кафедра цифровых технологий; доцент, кафедра программирования и информационных технологий, факультет компьютерных наук, Воронежский государственный университет.

E-mail: alvahtin@gmail.com

10. *Славуцкая М. В.* Внимание и движения глаз. Строение глазодвигательной системы, феноменология и программирование саккады / М. В. Славуцкая, В. В. Моисеева, В. В. Шульговский // Журнал высшей нервной деятельности им. И. П. Павлова. – 2008. – Т. 58. – № 1. – С. 28–45.

11. *Гергель В. П.* Высокопроизводительные вычисления для многоядерных многопроцессорных систем / В.П. Гергель. – М. : Изд-во МГУ, 2010. – 544 с. – (Суперкомпьютерное образование).

Turovsky Ya. A. – Ph. D. (Med.), Associate Professor, Head of Medical Cybernetics Laboratory, Digital Technologies Department, Faculty of Computer Science, Voronezh State University.

E-mail: yaroslav_turovsk@mail.ru

Borzunov S. V. – Ph. D. (Phys.-Math.), Associate Professor, Digital Technologies Department, Faculty of Computer Science, Voronezh State University.

E-mail: sborzunov@gmail.com

Vakhtin A. A. – Ph. D. (Phys.-Math.), Associate Professor, Leading Programmer, Medical Cybernetics Laboratory, Digital Technologies Department; Associate Professor, Department of Programming and Information Technologies, Faculty of Computer Science, Voronezh State University.

E-mail: alvahtin@gmail.com