

людей с родственниками, коллегами и работниками ИМК, о которой говорилось выше, стала возможной как раз благодаря использованию интерфейсов, снимающих ЭЭГ с кожи головы.

Дело в том, что уже в первых исследованиях с регистрацией ЭЭГ, проводившихся за много десятилетий до появления ИМК, было показано, что при мысленном выполнении человеком многих задач в этом сигнале происходят настолько крупные изменения, что они видны даже невооруженным глазом. Правда, детальные исследования показали, что специфичность связи этих изменений и выполняемых задач не очень высока. Например, большинство видов умственной деятельности вызывает более или менее генерализованное подавление альфа-ритма (колебаний с частотой около 10 Гц) и усиление бета-ритмов (более высокочастотных колебаний).

Но в компьютерной технике, да и в коммуникации между нейронами с помощью всего лишь двух уровней сигнала в канале связи (единиц и нулей) можно кодировать огромные объемы информации. И некоторые из наиболее эффективных неинвазивных ИМК как раз и используют этот двоичный принцип.

К сожалению, невозможно быстро и часто переключаться от одной мысленной задачи к другой, и это резко ограничивает скорость работы ИМК, которым управляют с помощью мысленных задач. Разумеется, разработчики нередко пытаются заменить дискретное управление градуальным, которое могло бы резко повысить объем передаваемой через ИМК информации, но оно оказывается слишком неточным. К тому же, из-за неизбежной сильной «зашумленности» ЭЭГ-сигнала электрической активностью разнообразных нейронных систем, непосредственно не участвующих в управлении, даже распознавание дискретных команд обычно требует неоднократного повтора мысленной задачи или выполнения ее в течение достаточно большого времени (по крайней мере несколько секунд). Только таким путем удается в нужной мере увеличить отношение сигнал — шум и достичь приемлемых значений точности.

Глаз — мозг — компьютер

Можно ли сделать доступные и безопасные неинвазивные ИМК практически полезными при всех тех ограничениях, о которых было сказано? Именно над этим сейчас работают исследователи и разработчики во многих странах мира. Важное направление такой работы — адаптация ИМК к задачам, в которых двоичное кодирование и низкая скорость срабатывания интерфейса приемлемы.

Второе направление — это объединение возможностей ИМК и других современных технологий взаимодействия человека и техники. Именно таким объединением и занимается наша лаборатория: мы разрабатываем гибридные неинвазивные интерфейсы глаз — мозг — компьютер (ИГМК).

В ИГМК объединяются интерфейс мозг — компьютер (ИМК) и управление с помощью перемещений и фиксации взгляда — как правило, на основе айтрекинга (видеоокулографии), точного отслеживания взгляда, использующего анализ видеозображения глаза. Как и неинвазивные ИМК, такие технологии имеют свои ограничения. Их главная проблема носит название проблемы прикосновения Мидаса.



Что кодируется в ИМК

При печатании текста чаще всего используют подсветку букв алфавита на экране. Чтобы напечатать нужную букву, надо внимательно считать, сколько раз она мигнет, не обращая внимания на мигания других букв. Наличие в ЭЭГ ответа, связанного со счетом буквы, говорит о том, что человек считал появившуюся в данный момент подсветку, а отсутствие — что он ее не считал. Зная, в какие моменты подсвечивались разные буквы, сравнением ЭЭГ после каждой из подсветок можно определить, какую именно букву нужно напечатать.

В других ИМК используется кодирование с использованием нескольких возможных вариантов. Например, можно отдельно распознать воображаемое движение левой рукой, правой рукой, ногами и языком. Но чем больше «кодов» одновременно используется, тем выше вероятность ошибки.

Пользователь айтрекингового интерфейса приобретает необычные способности. Так, он может управлять компьютером с помощью одних лишь фиксаций взгляда на экранных кнопках. Но за эти способности ему приходится платить отдачей нежелательных команд, которая происходит при естественных, непроизвольных фиксациях взгляда — как царь Мидас из греческого мифа превращал в золото все, к чему прикасался. Традиционные подходы к решению проблемы прикосновения Мидаса делают айтрекинговое управление в большинстве его приложений медленным и неудобным. А вот ИГМК потенциально способен дать более универсальные решения, основанные на ЭЭГ-маркерах управления, распознаваемых в онлайн-режиме с помощью ИМК-технологии.

ИГМК появились в мире лишь в последние годы, и до сих пор расширения их возможностей не удавалось достичь из-за слишком механистического сопряжения существующих технологий.

Мозг играет взглядом

Наша лаборатория стремится уходить от механистических подходов и разрабатывать гибридные интерфейсы, составные части которых дополняли бы друг друга максимально эффективно. Так, в нашем первом ИГМК, где в ИМК-компоненте для отдачи команды роботу применялось распознавание реакций мозга на подсветки, мы использовали то обстоятельство, что попытка отдачи команды путем счета подсветок начинается с перемещения взгляда в позицию, где подсветки возникают. С использованием детекции этого перемещения взгляда мы достигли нетипичного для неинвазивного ИМК сочетания низкой частоты ошибочных срабатываний (в среднем один раз в 10 минут) и сравнительно высокой скорости отдачи команды (за 3.6 секунды).

В последующих же работах мы стали использовать принцип «пассивного ИМК». Такие ИМК не требуют от пользователя выполнения специальных мысленных действий — они определяют, когда и какую команду следует отдать, посредством анализа ЭЭГ и учета контекста текущей деятельности.

Чтобы разобраться, какие ЭЭГ-маркеры можно использовать в ИГМК, мы ведем регистрацию ЭЭГ на фоне управления испытуемыми компьютером с помощью фиксаций взгляда. При этом мы, как правило, используем «взглядоуправляемые» игры, специально разрабатываемые нами на основе традиционных компьютерных игр.

Мы записываем ЭЭГ, и когда управление включено, и когда оно выключено, — то есть когда испытуемый может свободно рассматривать то, что он видит на экране, не опасаясь, что компьютер воспримет продолжительную фиксацию взгляда как подачу команды. Проводя сравнительный анализ этих ЭЭГ, мы находим те компоненты мозговой активности, которые характерны для управления. С помощью пассивного ИМК, нацеленного на выделение таких компонентов, управляющие фиксации уже удается отличать от спонтанных.

От управления взглядом к тренингу внимания

В настоящее время мы ведем эксперименты с онлайн-версией ИГМК,

разработанной с учетом наших первых результатов. Испытуемый играет в «глазоуправляемую» версию игры «Линии», переставляя шарики с помощью фиксации взгляда — сначала на шарике, а затем в той позиции, в которую он хочет его переместить. Во время нескольких первых игр ЭЭГ регистрируется в периоды осуществления управления и в периоды, когда оно отключено, чтобы обучить статистический классификатор, используемый в ИГМК, — как и в обычных ИМК, для эффективного распознавания попыток отдачи команды классификатор должен настроиться на индивидуальные особенности пространственно-временных характеристик мозговой активности данного пользователя.

Затем управление переводится в режим постоянного включения, а для предотвращения непроизвольного срабатывания используются два способа борьбы с «проблемой прикосновения Мидаса». Первый из них стандартный, заключающийся в повышении минимальной длительности фиксаций взгляда, требующихся для срабатывания интерфейса. Второй использует классификацию ЭЭГ, регистрирующейся во время фиксации, и в случае, если классификатор относит этот участок ЭЭГ к классу, соответствующему управлению, интерфейс срабатывает на полсекунды раньше, чем при использовании стандартного способа.

Классификатор в нашем эксперименте настраивается так, чтобы его ошибочные срабатывания, обычно раздражающие игрока и снижающие вовлеченность в процесс управления, случались как можно реже. Сделать это можно за счет повышения вероятности пропуска отдачи команды — ведь в этом случае интерфейс все равно срабатывает, как только будет достигнут порог фиксации, соответствующий стандартной методике.

Наша гипотеза заключается в том, что быстрое срабатывание ИГМК все же будет ощущаться участниками эксперимента как более желаемое и их мозг постепенно научится при отдаче команд вырабатывать все более четко распознаваемые классификатором компоненты ЭЭГ.

Есть основания думать, что это будет происходить путем повышения концентрации внимания или как-то сопряжено с повышением концентрации внимания. И тогда мы получим не только методику для эффективного управления с помощью ИГМК, но и методику тренировки внимания и, возможно, других когнитивных функций.

Управление техникой «силой мысли» уже сегодня стало вполне доступным благодаря интерфейсам мозг — компьютер. Скорость и точность такого управления пока оставляет желать лучшего. Однако ведущиеся сейчас исследования позволяют надеяться на превращение интерфейсов мозг — компьютер в практически полезную технологию уже в недалеком будущем.



Инвазивность vs неинвазивность

Регистрация сигнала от электродов, находящихся под черепом, но не в самом мозге, — так называемая электрокортикограмма (ЭКoГ), — значительно безопаснее и дешевле, чем использование электродов, вживленных в мозг.

В последние годы число исследований работы ИМК на основе ЭКoГ в мире выросло. В том числе и потому, что появилось много людей, которым временно устанавливают электроды для ее регистрации с целью уточнения границ очага поражения при тяжелых формах эпилепсии.

В ЭКoГ, как и в ЭЭГ, сигналы от отдельных нейронов неразличимы, но она дает возможность более детально выделять компоненты сигнала. Соответственно, ИМК на основе ЭКoГ оказываются намного более эффективными, чем на основе ЭЭГ. Но все-таки это скорее количественные, а не качественные различия.

Исследования ведутся по проектам, выполняющимся в НИЦ «Курчатовский институт» под руководством чл.-корр. РАН Б.М. Величковского при поддержке гранта Российского научного фонда (проект 14-28-00234 — «В поисках «Я»: междисциплинарное исследование порождения произвольного действия») в части поиска маркеров преднамеренных действий и разработки ИГМК и гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект 15-29-01344 офм — «Исследование и моделирование волновой интеграции крупномасштабных нейросетей мозга: подходы к выявлению когнитивных состояний внимания у человека») в части развития методов классификации ЭЭГ-сигнала.