

Сила мысли

Д. В. Карловский,
компания «Нейроботикс», Зеленоград



«Работы по созданию нейрокомпьютерного интерфейса начались в семидесятих годах прошлого века, когда американцы решили создать истребитель, управляемый силой мысли пилота. Тогда это была авантюра, которая не привела к практическим результатам. А в девяностые годы начался настоящий бум работ по управлению компьютером с помощью мысли. Мы занялись этим направлением в 2006 году, когда началась работа нашего института с зеленоградской компанией «Нейроботикс», а финансовую поддержку проекту оказала компания «Бинейро». За короткий срок удалось добиться неплохих результатов — на общем собрании РАН в конце 2007 года создание отечественного нейрокомпьютерного интерфейса президент Ю.М.Осипов отметил в качестве основного достижения в области физиологии человека», — говорит академик И.А.Шевелев, советник Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии (ИВНД) РАН.

Его слова подтверждаются данными статистики. Если в 1999 году в мире была всего 21 лаборатория, изучающая это направление, то сейчас их число перевалило за сотню. Только на один проект, связанный с фундаментальными исследованиями, необходимыми для создания нейрокомпьютерного интерфейса, на срок 2006—2010 годы из средств 6-й Рамочной программы ЕС выделено 6,4 млн. евро. В нашей стране лидером этого направления стала компания «Нейроботикс». Ее сотрудники при участии ученых из ИВНД РАН и Института нейрохирургии им. Н.Н.Боткина РАМН разработали несколько программ, которые помогают пациентам, пережившим нейрохирургическую операцию, устанавливать контакты с внешним миром в тот период, когда сознание у человека уже есть, а средств коммуникации еще нет. Академик Шевелев считает, что это самое интересное направление в проблеме нейрокомпьютерного интерфейса. Специалисты компании задумываются также о создании систем виртуальной реальности, компьютерных миров, управляемых силой мысли.

Как это выглядит

Например, так. Человек в шапочке с электродами сидит и внимательно следит за четырехколесным механизмом на столе. А этот механизм по столу перемещается, причем без всяких проводов. Может показаться, что че-

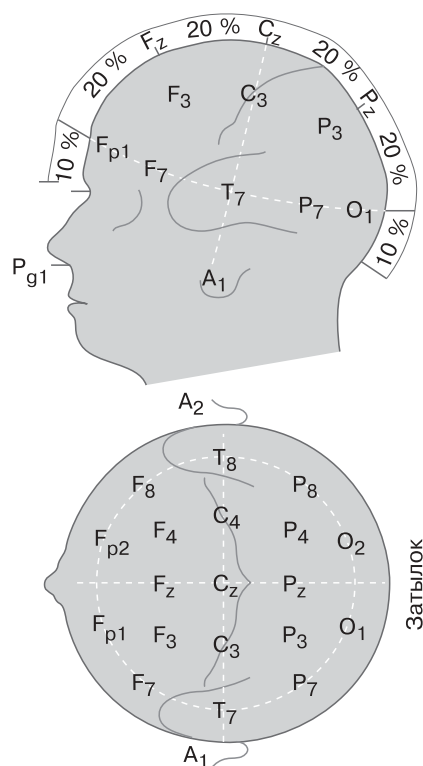
ловек заставляет механизм двигаться силой своего взгляда или мысли. Последнее ближе всего к действительности: с помощью нейрокомпьютерного интерфейса именно мысль человека превращается в последовательность команд, понятных для процессора робота, которые и передаются ему в виде

радиосигнала. Движение такого управляемого мыслью робота аналогично перемещению курсора по монитору, только вместо направлений «вверх-вниз-вправо-влево» тут используют «вперед-назад-вправо-влево». Если бы у робота была еще одна степень свободы — движение в третьем измерении, — управлять им было бы сложнее, но тоже возможно.

Нейрокомпьютерный интерфейс сегодня позволяет решать четыре задачи. Помимо управления движением курсора или робота, это набор текста, компьютерные игры и работа в Интернете. Совсем недавно стали появляться и управляемые мыслью системы виртуальной реальности, когда человек с помощью мысленных команд перемещается по виртуальному пространству. Преимущества таких подходов состоят в том, что нет потребности в каких-то дополнительных движениях; все происходит совершенно естественно — подумал, и действие совершилось. Недостаток же состоит в том, что на формирование команды порой приходится тратить много времени, а человек, вынужденный постоянно сосредоточиваться, быстро утомляется.

Как это работает

Мысль — это процесс взаимодействия нейронов. Во время него в мембранах нервных клеток открыва-

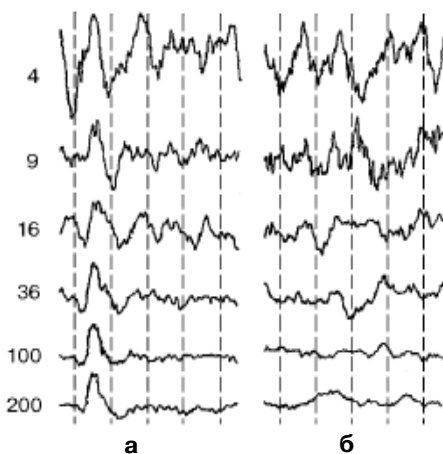


1
Международная схема расположения электродов для снятия энцефалограмм

ются и закрываются ионные каналы, вырабатываются специальные химические вещества — медиаторы. Их действие на нейрон приводит к генерации, а затем — к передаче электрических импульсов. При этом неизбежно изменяются электрические потенциалы мозга. Кроме того, к активно работающей области мозга притекает больше крови, которая доставляет работающим нейронам энергию и удаляет продукты их жизнедеятельности. В общем, получается, что рождение мысли сопровождается целым набором сигналов, которые можно зафиксировать, а потом попытаться расшифровать.

Наиболее совершенный метод, который сейчас имеется в руках у физиологов, — энцефалография, измерение активности мозга с помощью электродов. Их располагают на голове по стандартной, принятой еще в 50-х годах схеме (рис. 1). Электроды регистрируют колебания электрической активности мозга, которые складываются из различных элементарных процессов. В частности, среди этих процессов могут быть и так называемые вызванные потенциалы — электрические колебания, которые возникают в структурах мозга в ответ на раздражение рецепторов. А такое раздражение получается в результате предъявления стимула (например, появление на экране задуманной человеком буквы), причем

развитие этих колебаний во времени жестко привязано к моменту, когда стимул был предъявлен. Впрочем, вызванный потенциал может возникнуть не только в ответ на какой-то внешний раздражитель. Он может быть и реакцией на внутренние стимулы, то есть на сами по себе мысли. Среди таких потенциалов физиологи нашли реакцию на пропущенный внешний стимул, активность какой-нибудь моторной зоны мозга при подготовке к движению, потенциалы, связанные с намерениями, вниманием, готовностью, ожиданием. Современная техника позволяет выделить любой из такого рода потенциалов. Главное условие — нужно четко зафиксировать событие, после которого следует ожидать возникновения потенциала. Дело в том, что обычно вызванные потенциалы слабо различимы на фоне спонтанной электрической активности мозга. Поэтому приходится стимул предъявлять не один раз и усреднять получающийся сигнал. При этом предполагается, что один и тот же стимул при многократном предъявлении каждый раз приводит к появлению на энцефалограмме сигнала схожей формы, в то время как спонтанные колебания постоянно меняются. После усреднения таких сигналов фон обнулится, а полезный сигнал, наоборот, возрастет (рис. 2).



2
Так (а) выделяется одиночный потенциал при многократном суммировании энцефалограмм, а так (б) обнуляется случайный шум

Сейчас удастся надежно выделять восемь видов потенциалов. Это прежде всего потенциалы, которые возникают в ответ на зрительные (вспышки света, образы), слуховые (щелчки, тональные звуки), соматосенсорные (касания, пассивные движения) стимулы, потенциалы, связанные с движением и готовностью к нему, а также связанные с самой по себе работой мозга: потенциал на пропущенный стимул, медленный негативный потенциал, который возникает, когда человек готовится ответить действием на ожидаемый стимул, негативный потенциал рассогласования, когда стимул распознается автоматически без привлечения внимания, и потенциал опознания редкого случайно возникающего стимула Р300.

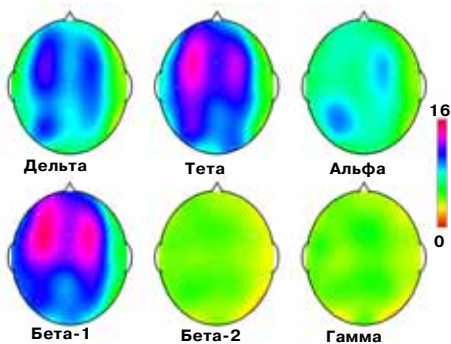
Р300

Р300 — так называется наиболее успешная методика изучения потенциалов мозга для создания нейрокомпьютерных интерфейсов. Ее в 1986 году предложили Лоуренс Фаруэлл и Эммануэль Дончин с кафедры психологии и когнитивной психофизиологии Иллинойского университета, а в 1988 году они создали на этой основе первый надежно работающий нейрокомпьютерный интерфейс для мысленного ввода латинских букв в компьютер. Суть методики состоит в том, что человеку предъявляют два стимула, один из них незначим и появляется часто, а второй значим и появляется редко. Именно за появлением значимого человек и должен следить. Например, в созданном нами интерфейсе для ввода кириллицы эта задача выглядит следующим образом.

Человек задумывает букву или слово. Перед ним находится экран со всеми буквами русского алфавита. Эти буквы по очереди мерцают случайным образом. Человек же должен просчитать, сколько раз мелькнула задуманная им буква. Благодаря такой нехитрой уловке его внимание сосредоточивается именно на задуманной букве.

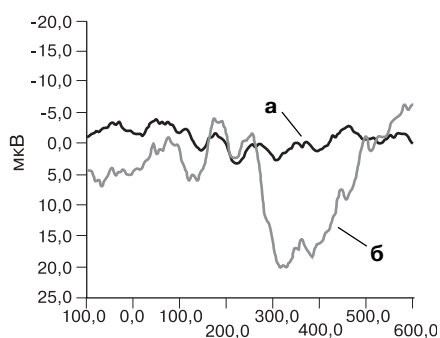
манной букве. В результате потенциал, который возникает при ее появлении, отличается от того, что получается при подсветке любой другой буквы. Главное его отличие — присутствие так называемой большой позитивной волны спустя примерно 300 мс после предъявления стимула (рис. 3). От этих 300 мс потенциал и получил свое название.

Наш эксперимент по созданию системы для ввода букв состоит из двух этапов. На первом этапе каждый участник знакомился с набором обучающих данных, которые необходимы для последующей классификации сигналов его мозга. Одновременно выясняли, пригоден ли человек для участия в эксперименте. Как оказалось, только у одного участника из пяти потенциал P300 был выражен недостаточно сильно. Данные поступали с 40 электродов, однако в анализе участвовало только четыре, а наилучшие данные шли с того, который закреплен в положении Pz (см. рис. 1). Для того чтобы выделить искомый сигнал, применяли несколько способов анализа энцефалограмм, в основе которых лежит предположение, что если потенциал P300 присутствует на ней, то он ярко выражен. В одном из способов, методе площадей, просто подсчитывается площадь под участком энцефалограммы в интервале 200—500 мс. Если площадь велика, значит, искомый сигнал присутствует. В методе максимумов берется величина наибольшего пика энцефалограммы на этом же участке. Третий метод — ковариации — определяет, насколько похожа снятая энцефалограмма на ту, что была получена во время обучения. В разных случаях эффективность методов была различной, поэтому их приходится использовать в комплексе. Если результаты расчета свидетельствовали



4

Мысленное желание пошевелить рукой приводит к повышению активности соответствующего полушария, и это проявляется на различных ритмах энцефалограммы



3

Различие потенциалов при появлении незначимого (а) и значимого (б) стимулов

ли, что при подсветке какой-то буквы возникал потенциал P300 и это случалось несколько раз, то компьютер считал, что именно эту букву человек и хочет набрать. Результаты же свидетельствуют, что мысленный ввод значащих слов удается лучше, чем случайной последовательности букв. Скорость такой мысленной печати, правда, не очень велика, на опознание одной задуманной буквы уходит несколько десятков секунд, однако это только начало. Резервы же для многократного ускорения процесса есть, поскольку зарубежные коллеги уже достигли скорости 12 бит, или 3 буквы в минуту.

Перемещения курсора

Принципиально другой подход к созданию нейрокомпьютерного интерфейса состоит не в выделении того или иного потенциала, а в анализе общей активности мозга и поиске в ней определенных картин, так называемых паттернов. Причина понятна — методы с предъявлением стимула не годятся для такой задачи, как перемещение курсора. Одними из первых добились успеха в создании такого интерфейса в 1995 году Александр Костов и Марк Полак из Университета Альберты (Канада). Для решения задачи они сначала обучали компьютер распознавать необходимые картины электрической активности мозга. При этом человек пытался переместить курсор на экране, а компьютер фиксировал и запоминал возникающие паттерны активности. После того как курсор уверенно перемещался по экрану, обучение заканчивалось. Разные люди выбирали разные способы управления курсором. Например, одни представляли движение лифта вверх-вниз, другие использовали приятные воспоминания для движения курсора вверх и неприятные для движения вниз. Как бы то ни было, только у двух человек точность исполнения команд оказалась 70—85%.

Более успешной была работа доктора Нильса Бирбаумера из Тюбингенского университета (Германия), который в 1999 году создал «Машину передачи мыслей» (thought—translation device). Он использовал медленные корковые потенциалы, которые наиболее выражены над центральными областями коры, то есть в районе макушки. Управлять этими потенциалами можно с помощью эмоционально окрашенных переживаний или различных видов мыслительной деятельности. Работа состоит из сеансов, каждый из которых занимает по четыре секунды. Из них две секунды человек создает нужный вид потенциала, он и превращается в команду для компьютера. Овладеть машиной для передачи мыслей непросто — как правило, требуется не менее 100 тренировок, что отнимает от трех до пяти месяцев, однако научиться использовать этот интерфейс может любой человек. Во всяком случае, доктор Бирбаумер обучил 11 человек, из которых семеро страдали от locked-in синдрома, при котором пациент находится в сознании, но контакт с ним невозможен, поскольку из-за паралича всех частей тела двигаются лишь глаза.

В нашей лаборатории в качестве паттернов для управления роботом мы используем изменение активности энцефалограммы в разных областях мозга для разных направлений движения. Поначалу оператор решает отдельные задачи. Например, чтобы повысить активность лобных долей, он выполняет аналитические операции — мысленно считает в обратном порядке и с неудобным шагом, скажем от 673 до нуля с шагом 17. Такая методика выбрана потому, что обычный счет «один-два-три» взрослый человек выполняет автоматически. Чтобы возник сигнал в правом (левом) полушарии, нужно мысленно сжать левую (правую) руку (рис. 4). Активность в затылочной области повышает мысленное вращение трехмерных объектов, например куба. Через некоторое время оператор уже сможет обходиться без таких сложностей, и будет просто думать о том, что робот должен поехать вперед или направо.

Прогулки под ритм мозга

Еще один подход связан с управлением ритмами электрической активности мозга. Самый известный среди них — альфа-ритм, который соответствует состоянию покоя. Кроме него, есть еще много других ритмов. Создатели нейрокомпьютерных интерфейсов используют мю- и бета-ритмы. Макси-

мум первого фиксируют в районе электродов Cz, C3 и C4. Этот ритм состоит из двух компонент с частотами 10 и 20 Гц, причем обе компоненты подавляются во время движения, но по-разному. Мю-ритм связан с планированием и осуществлением движения. Этим воспользовались ученые из Института поиска знания во главе с доктором Гертом Пфюртшеллером и построили на основе анализа мю-ритма собственный грац-интерфейс (по названию австрийского города Грац, где находится институт). Как оказалось, картина изменения мю-ритма оказывается различной при мысленном движении правой, левой руки или, например, правой ноги. С помощью грац-интерфейса созданы системы, которые позволяют больному с парализованными конечностями управлять внешним протезом руки, а также набирать буквы или перемещать курсор. Два года назад группа доктора Пфюртшеллера сообщила о работе по управлению системой виртуальной реальности: участники эксперимента совершали мысленные перемещения по трехмерному изображению главного зала Австрийской национальной библиотеки. В среднем путь через зал, который шел не напрямик, а огибал стоящую по центру колонну, занимал около тысячи секунд.

Другую версию интерфейса, связанного с анализом ритмов мозга, предложили ученые из группы доктора Джонатана Уолпау из Вудсвортского центра Университета штата Нью-Йорк. Ее так и называют вудсворт-интерфейс. В 1991 году Уолпау с коллегами построили первую систему для одномерного перемещения курсора на основе

произвольного управления мю-ритмом, причем четыре из пяти участников эксперимента научились это делать за несколько недель. В 1994 году была предпринята попытка перейти к двумерным перемещениям, когда оператору нужно было независимо контролировать мю-ритм в правом и левом полушариях мозга. Метод оказался очень сложным, и пришлось вернуться к одномерному движению, которым стали управлять одновременно с помощью мю- и бета-ритмов. Это было легче сделать: оператор приобретал необходимые навыки за шесть—десять 40-минутных занятий, которые продолжались две-три недели. Вначале оператор использовал мысленные движение руками или всем телом, затем по мере тренировок эти мысленные действия становились все менее значимыми, и в конце концов перемещать курсор удавалось так, словно человек совершал обычные движения, не осознавая того, как, собственно, он это делает.

К 2004 году удалось достаточно хорошо отладить методику работы с двумя ритмами мозга, чтобы перейти к двумерному управлению курсором. При этом ученые из группы Уолпау использовали то обстоятельство, что бета-ритм с частотой 18—26 Гц можно контролировать независимо от мю-ритма, частота которого составляет 8—12 Гц. За два—четыре месяца тренировок четыре оператора, двое из которых были здоровыми, а у двоих поврежден спинной мозг, научились управлять двумерными перемещениями курсора. Как видно из рис. 5, траектории перемещения курсора, которые принадле-



ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ НАУКИ

жат больным людям, гораздо лучше, чем у здоровых. И с заданиями они справлялись в два раза быстрее.

Для чего это нужно

Сейчас основное применение нейрокомпьютерного интерфейса — помощь инвалидам. Видимо, не далек тот день, когда полностью парализованные люди смогут наладить более-менее полноценное общение с окружающими и даже освоить перемещения в инвалидной коляске, управляемые силой мысли.

В будущем, скорее всего, разработка необходимых инструментов — компьютерных алгоритмов и методов изучения активности мозга — приведет к созданию совершенно фантастических систем, управляемых мыслью человека, которые могут качественно изменить нашу жизнь. Это и возможность совершать виртуальные путешествия, не вставая с кресла и, стало быть, не загрязняя окружающую среду перемещениями физического тела на самолете или автомашине. Это и компьютер, лишенный клавиатуры с мышкой и способный управлять интеллектуальным домом, подчиняясь мыслям его хозяина. Это и новые виды искусства — создание виртуальных миров, по степени достоверности идентичных реальным. Основное устройство таких систем на сегодня — шлем, в котором проецируется компьютерное изображение некоего виртуального пространства. Чтобы ориентироваться в нем, пользователь должен вертеть головой или работать манипулятором. Это неестественно, ведь в реальной жизни мы решаем пойти налево и идем туда без дополнительных движений головой или руками. При управлении с помощью мысли человеку не придется делать никаких движений, а будет достаточно подумать, что он хочет свернуть налево, и изображение перед ним повернется соответствующим образом. Таким образом, в дополнение к привычным каналам коммуникации — зрению, слуху, осязанию, обонянию — человек, сидящий перед компьютером, получит еще два канала: восприятие и мышление.

5

Траектории перемещения курсора в экспериментах А.Уолпау:

б, в — здоровые люди; а, г — пациенты с повреждениями спинного мозга

