

# КОМП'ЮТЕРНІ ЗАСОБИ, МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ

*Успехи развития микроселектронной элементной базы позволяют надеяться, что в будущем появятся компьютеры и другие средства вычислительной техники, которые, наряду с анализаторами и синтезаторами речи, будут содержать «электронный нос», «электронный глаз», «электронный язык» и т.п. На основе анализа отечественных и зарубежных публикаций рассматриваются основные направления развития этих устройств.*

© С.Г. Золкин, 2005

УДК 004.896

С.Г. ЗОЛКИН

## МОДЕЛИ БИОРИТМОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ УЧАСТКАМИ КОРЫ ГОЛОВНОГО МОЗГА

Одним из основных направлений развития робототехники является возможность придания роботам навыков и умений человека, способностей к суждениям с последующим вытеснением или совершенствованием уже существующей технологии. Решение этих задач требует наличия математических моделей изучаемых явлений, позволяющих применять количественные методы исследования и оценивания.

Необходимость применения робототехнических систем в производстве диктуется, в основном, следующими причинами: энергетические затраты или условия выполнения работы неприемлемы для человека; выполнение операции вручную не обеспечивает требуемого качества; экономическая целесообразность внедрения в производство более совершенных технологий. Для успешного функционирования робототехнических систем выдвигаются общие требования моделирования, перспективного планирования и оперативного управления в реальном масштабе времени. Восприятие и интерпретация данных об окружающей обстановке играют важнейшую роль при управлении действиями адаптивного робота [1]. Основные функции сенсорной системы человека и животных состоят в обеспечении возможности обнаружения, различения и опознания сигналов внешнего мира, т. е. формировании сенсорных образов. В свою очередь, реализация этих функций приводит к определенному состоянию и (или) двигательному поведению

живого организма. При этом оценка своего поведения и поведения внешних объектов является основой мышления. Выделение полезной информации из сигналов датчиков технического очувствления и ее обработка способны дать роботам возможность собирать, оценивать и анализировать данные об окружающей среде в рамках функциональных моделей интеллектуальных систем, поведенчески аналогичных человеку [1].

**Постановка задачи.** Цель работы – создание математических моделей, пригодных для прогноза реакции интеллектуальной системы робота при восприятии и интерпретации различной информации – световой, звуковой, концентрационной (запаховой), а также определение возможности использования полученных моделей для увеличения скорости этой реакции. Для реализации поставленной задачи используется система регрессионных полиномов, характеризующая активацию различных участков коры головного мозга человека, направленность и степень взаимодействия между участками коры, межполушарную функциональную асимметрию и межполушарные связи участков коры, возникающие под влиянием различных внешних раздражителей.

**Основная часть.** Сенсорная система человека – это совокупность вспомогательных образований, рецепторов, нервных путей и центров, раздражение которых приводит к появлению специфического чувства, характерного для данной сенсорной модальности, т. е. для данного типа раздражителя. Сенсорная система выступает как определенная локализованная анатомическая система, выполняющая специализированную функцию обнаружения и преобразования информации в нервный код, в котором заключена совокупность описания признаков воспринимаемого объекта или явления. В настоящее время основные данные по физиологии сенсорных систем получены с помощью двух методов – психофизического и электрофизического. Первый из них дает представление о работе сенсорной системы в целом, второй выявляет аналитические данные о работе больших совокупностей или одиночных структурных элементов, составляющих сенсорные системы. Кроме этих подходов, данные о деятельности сенсорных систем получены с помощью других аналитических методов: биохимических, фармакологических и морфологических (например, установление системы связей между сенсорными центрами). При этом все вышеперечисленные методы направлены на выяснение двух главных вопросов: а) каковы возможности сенсорной системы при формировании сенсорных образов и их опознании; б) какая обработка информации о внешнем сигнале происходит в сенсорной системе для этого опознания. Согласно физиологическим данным за обработку информации, поступающей от сенсорных систем, и реализацию функций сознания, речи, мышления (понимания и манипулирования понятиями), памяти (включая процессы обучения), эмоций у человека отвечают структуры, локализованные главным образом в новой коре головного мозга (неокортексе). Процесс формирования новой коры связан с представительством всей совокупности сенсорных систем. Характерной чертой корковой проекции сенсорных систем является их множественный характер представительства в коре. Разграничивают первичные, вторичные и третичные проекции. Первичные проекции являются окончанием

быстропроводящих сенсорных каналов и отвечают за прием и обработку сигнальной информации. Они имеют достаточно определенные границы в пределах неокортекса. Первичные корковые зоны окружены вторичными зонами той же сенсорной системы, которые принимают интегрированную информацию. Вторичные корковые поля не имеют прямой связи с периферией, в них осуществляется переработка информации и ее сравнение с ранее накопленной информацией (памятью), что определяет приобретенный опыт. Вторичные корковые поля отвечают за гнозис (способность к узнаванию полученной информации по чувственным восприятиям на основе опыта, практики, навыка) и праксис (действия различной степени сложности, выработанные на основе опыта, навыка, практики и закрепленные стереотипом). Наконец, выделяют зоны перекрытия разных сенсорных систем, где происходит межсенсорное взаимодействие, – третичные зоны или ассоциативные поля. Они обеспечивают сложные виды деятельности: программирование действий, поведение, индивидуальные характеристики человека.

Выявление связей между перечисленными зонами, возникающих в процессе приема и обработки сенсорной информации, может способствовать созданию требуемых математических моделей. Расположение долей коры головного мозга и корковых полей приведено в [2]. В свою очередь первичные, вторичные и третичные зоны включают в себя корковые поля, отличающиеся по своему строению и функциональности. На основе особенностей строения коры и с учетом данных цито-, миело-, глио- и ангиоархитектоники в ней выделяют 11 областей, включающих 52 поля. Цитоархитектоническая карта коры головного мозга человека по Бродману с обозначением цифрами и выделением специальными символами различных полей приведена в [4]. Согласно [4] к первичным корковым полям относятся: зрительное поле – 17; слуховые поля – 41, 42; обонятельное поле – 11; соматосенсорные поля – 1, 2, 3; моторное поле – 4 (в нем имеется четкая топографическая проекция мышц тела, обеспечивающих наиболее точные и разнообразные движения). Ко вторичным корковым полям относятся: зрительные – 18, 19; слуховые – 21, 22; обонятельное – 12; соматосенсорные – 5, 7; моторное – 6 (осуществляет высшие двигательные функции, связанные с планированием и координацией произвольных движений). К третичным корковым зонам относятся поля лобной области – 8 – 12, 32, 33, 44 – 47, а также теменные поля – 30, 31, 39, 40. Сигнальное значение имеют все сенсорные стимулы, но способностью опережающего воздействия обладают зрительные и слуховые, а также обонятельные сигналы. Рассмотрим группы полей, относящихся к этим сигнальным системам.

Зрительная сигнализация для человека обладает наибольшей физиологической силой (около 80% информации о внешнем мире), поэтому степень кортикализации зрительной системы очень высока. Первичная зрительная кора находится в поле 17, вторичные поля – 18 и 19, кольцеобразно окружают первичную зону. Информация о форме, цвете, движении, удаленном расположении объектов обрабатывается частями зрительной системы как последовательно, так и параллельно. Наиболее сложные объекты обрабатываются в ассоциативных обла-

стях мозга – третичные поля 30, 31, 33, 39, 40, 45, 46, с подключением процессов внимания и памяти. На высших уровнях зрительной системы параллельно функционируют две системы анализа: одна определяет место предмета в пространстве, другая описывает его признаки. Когда конечные результаты последовательных и параллельных процессов интегрируются, возникает законченный зрительный образ окружающего мира. Первичная слуховая кора находится в полях 41, 42. Эта зона обеспечивает механизмы непосредственного восприятия и дифференцировку звуков. Вторичная слуховая кора прилегает снизу к зоне первичной проекции – в поле 22, частично 21. Наиболее сложные сигналы речевой системы обрабатываются в третичных лобных полях 44 – 47. Обоняние – первое чувство, появившееся в процессе эволюции, самый древний вид сенсорной реакции. Оно функционирует в тесном взаимодействии с другими сенсорными системами, обеспечивая ориентировку организма в пространстве. Основные поля обонятельной коры: переднее обонятельное ядро (первичная обонятельная кора – частично поле 11); грушевидная кора – играет главную роль в различении запахов (вторичная обонятельная кора – частично поле 12).

Переработанная различными вторичными корковыми полями информация интегрируется в ассоциативных зонах (третичных полях) неокортекса. Классические сенсорные системы со всей сложностью их мозговых конструкций не способны обеспечить функцию опознания сигналов. Они выполняют сложные процессы описания сигналов, осуществляя операцию кодирования информации. Операция опознания сигнала, т.е. отнесения его к определенному классу сигналов, записанному в аппаратах памяти, требует дополнительного участия ассоциативных структур мозга. С помощью этих структур сигнал оценивается как интегрированное целое, несущее значимую информацию для деятельности организма, – выполняется операция декодирования. Происходит селективный отбор одних видов информации с одновременным сопряженным торможением других сенсорных влияний. Важнейшая интегративная часть мозга – лобная доля, регулирующая программное обеспечение речи и движений тела. По ряду признаков архитектурные поля лобной области образуют ассоциативные зоны – поля 8 – 12, 32, 44 – 47. Длинные ассоциативные волокна связывают лобную область со всеми другими отделами коры, что создает условия для интегрирования информации.

Фронтальные области коры также отвечают за гашение ориентировочных реакций. Теменная кора является высшим центром формирования в мозге «схемы тела», являющейся уровнем отсчета координат внешнего пространства. Нижние теменные поля имеют наиболее тесное отношение к организации тонкодифференцированных предметных действий, реализация которых возможна только на основе зрительного контроля и ориентировки в пространстве. Поля 39 и 40, возможно 37, занимают переходную зону, соединяющую тактильную вторичную корковую зону с вторичными зрительными и слуховыми полями. Предполагается, что тактильная, вестибулярная, зрительная и слуховая информация, обработанная во вторичных зонах, интегрируется на высшем уровне в 39 и 40 полях. Необходимо учитывать, что правое и левое полушария выполняют раз-

ные функции, но совместно обеспечивают целенаправленное поведение. Правое полушарие контролирует и регулирует сенсорно-моторные и двигательные функции левой половины тела (поля 4 – 12, 17 – 19, 30 – 33, 36), а левое – правой (поля 4 – 11, 17 – 19, 21, 22, 37, 39 – 42, 44 – 47). Каждое полушарие обладает собственными ощущениями, восприятием, мыслями и идеями, характеризуется разной эмоциональной оценкой идентичных событий, располагает собственной цепью воспоминаний и усвоенных знаний, не доступных другому полушарию. В определенных отношениях каждое полушарие имеет преобладающее мышление: левое – речевое (поля 41– 47), правое – зрительно–пространственное (поля 17– 19, 30, 31, 37). Левое полушарие обрабатывает информацию аналитически и последовательно, правое – одновременно и целостно. Хотя левое полушарие отвечает за язык и речь, правое управляет пониманием и навыками, связанными с пространственным и зрительным восприятием, оно обладает способностью понимать речь, но не может ее программировать (поле 36). Левое и правое полушария в равной степени способны к распознаванию стимулов внешнего мира, но пользуются разными способами или стратегиями решения задачи и имеют разные возможности в выражении результатов решения: языковую – для левого полушария и пространственно–зрительную – для правого. В интактном мозге полушария взаимодействуют и обуславливают приспособляемость человека к окружающим условиям среды, пластичность его поведения, обеспечивая целостное восприятие внешнего мира и самого себя.

Таким образом, все сенсорные системы построены по принципу билатеральной симметрии. Основным механизмом парной деятельности сенсорной системы является механизм функциональной асимметрии при действии различным образом локализованных в пространстве объектов. Парная деятельность сенсорных систем заключается в сравнении пространственной модели ранее действовавшего стимула с новой пространственной локализацией того же стимула. Система связей между ассоциативными полями обеспечивает тесное единство обеих половин ассоциативной системы и создает высокую надежность ее функционирования. Кроме того, при всем многообразии структур и связей общими принципами организации при обработке информации в неокортексе являются принцип конвергенции – существования морфологически обусловленных многочисленных связей от нейронов различных модальностей, заканчивающихся на одном нейроне, и принцип дивергенции – многочисленных параллельных связей от одного нейрона ко многим другим за счет коллатералей. Принципы конвергенции и дивергенции обеспечивают дублирование передачи информации, что характерно для большинства афферентных систем, а также возможность срочной и многоступенчатой передачи информации. Срочные пути служат для передачи сигнала о наличии раздражающего воздействия, а многоступенчатые пути с большим числом конвергентных связей несут более полную информацию о раздражающем стимуле.

В высших отделах центральной нервной системы (неокортексе) происходит сопоставление поступающей афферентной информации о воздействии стимула с ответной эфферентной реакцией на наступающее раздражение (эфферентная

копия). Эти копии заранее сообщают о предполагаемой мышечной активности и о создаваемом ею движении. Они могут служить для устранения неоднозначности афферентной информации. Целостная сенсорная функция мозга обеспечивается содружественной деятельностью сенсорных, моторных и ассоциативных систем и направлена на организацию адаптивных движений и действий. Любая психофизическая функция зависит от одновременной работы нескольких сенсорных систем, т. е. является полисенсорной, и поэтому ее оценка не может быть локализована в ограниченных отделах мозга. Наиболее полная сигнальная значимость фактора окружающего пространства может реализовываться с участием тех структур мозга, куда приходит информация о факторах среды, разных по сенсорным качествам (модальности сигнала), т. е. по механизму одновременного гетеросенсорного сопоставления. Значит, степень совершенства интегративной деятельности мозга тесно связана со структурной дифференциацией и функциональной специализацией ассоциативных мозговых систем. Таким образом, особая роль ассоциативных систем – интеграция различных по физической природе (разномодальных) стимулов в единый сенсорный образ. Структура ассоциативных связей, возникающих между участками коры в ходе обработки различной информации, может быть использована при моделировании интеллектуальных систем.

В качестве одного из основных методов изучения механизмов обработки информации и управления поведением человека в настоящее время применяется электроэнцефалографическое исследование (ЭЭГ), результаты которого позволяют делать заключения о состоянии коры головного мозга и процессах, протекающих в ней (реакции пробуждения, активации, торможения и т.д.). При электроэнцефалографическом исследовании измеряют уровни сигналов следующих основных ритмов ЭЭГ:  $\delta$ -ритм (1–4 Гц),  $\theta$ -ритм (4–8 Гц),  $\alpha 1$ -ритм (8–13 Гц),  $\alpha 2$ -ритм (9–11 Гц),  $\beta 1$ -ритм (13–20 Гц),  $\beta 2$ -ритм (20–30 Гц). Согласно физиологическим данным регистрация сигналов  $\beta 1$ ,  $\beta 2$ -ритмов свидетельствует об активации исследуемого участка неокортекса в процессе приема и обработки сигнальной информации. Основные точки расположения контрольных датчиков отвечают нормам международной системы «10–20», в которой соответствие между положением каждого датчика с анатомическими структурами и областями коры головного мозга точно установлено рентгенологически, определены исходные точки отсчёта, учтена вариабельность анатомических структур, а также размеров и формы черепа. Точки расположения датчиков соответствуют тем областям мозга, на которые они проецируются: лобная – Fp1, Fp2 (frontalis), центральная – C3, C4 (centralis), затылочная – O1, O2 (occipitalis), височная – T3, T4 (temporalis), нечетные индексы соответствуют левым долям мозга, а четные – правым [3].

Соответствие проекций точек расположения датчиков полям неокортекса и краткая характеристика функциональности этих полей приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1

Точки расположения датчиков	Fp1	Fp2	C3	C4	O1	O2	T3	T4
$j$	1	2	3	4	5	6	7	8
Поля коры	45 – 47	11, 12, 32	4, 6	4	18, 19	17	41, 42	36

Для выявления статистических связей между полями неокортекса, возникающих в процессе приема и обработки сигнальной информации, был проведен эксперимент по регистрации биоэлектрической активности коры головного мозга человека при воздействии различных внешних раздражителей с применением метода ЭЭГ. В результате последующей обработки данных методом статистического корреляционно-регрессионного анализа, выявления статистически значимых связей с учетом погрешностей измерения была получена система регрессионных полиномов линейного вида

$$y_{ij}^p = \sum_{m=1}^7 b_{mj} y_{mj} + \sum_{n=1}^9 b_{in} y_{in} + \sum_{p=1}^4 b_p x_p, \quad (1)$$

где  $x_p$  – применяемый фактор внешнего воздействия;  $y_{ij}^p$  – значение уровня сигнала  $i$ -го ритма на  $j$ -м датчике при применении  $p$ -го фактора;  $y_{mj}$  – значение уровня сигнала  $m$ -го ритма на  $j$ -м датчике при применении  $p$ -го фактора;  $y_{in}$  – значение уровня сигнала  $i$ -го ритма на  $n$ -м датчике при применении  $p$ -го фактора;  $b_{mj}$ ,  $b_{in}$ ,  $b_p$  – оценки значений коэффициентов регрессии.

В качестве статистических моделей выделены полиномы, отражающие распределение энергии сигналов  $\beta 1$  и  $\beta 2$ -ритмов по участкам коры в зависимости от видов воздействия:

$$y_{45}^1 = -0.0868 y_{15} - 0.1013 y_{25} - 0.1169 y_{35} + 0.2501 y_{55} - 0.0280 y_{65} + 0.5973 y_{75} - 0.1573 y_{42} - 0.2371 y_{44} + 0.0802 y_{46} - 0.3959 y_{48} + 1.6981 y_{49} - 0.0058 x_1; \quad (2)$$

$$y_{46}^1 = -0.1269 y_{16} - 0.1096 y_{26} - 0.2665 y_{36} + 0.1962 y_{56} - 0.0201 y_{66} + 0.9327 y_{76} - 0.4376 y_{41} - 0.2139 y_{42} - 0.5018 y_{43} + 0.1190 y_{45} - 0.2912 y_{47} + 2.0833 y_{49} - 0.0096 x_1; \quad (3)$$

$$y_{47}^1 = -0.3530 y_{17} - 0.3765 y_{27} - 0.4188 y_{37} - 0.1568 y_{57} - 0.0287 y_{67} + \\ + 1.9787 y_{77} + 0.2827 y_{41} + 0.1660 y_{43} - 0.0449 y_{44} + 0.0471 y_{45} - \\ - 0.1424 y_{46} - 0.3573 y_{48} + 0.8419 y_{49} - 0.0008 x_1; \quad (4)$$

$$y_{45}^2 = -0.1469 y_{15} - 0.2047 y_{25} - 0.2946 y_{35} + 0.2541 y_{55} - 0.0266 y_{65} + \\ + 1.0785 y_{75} - 0.6463 y_{41} - 0.2599 y_{44} - 0.1788 y_{47} + 2.2187 y_{49} + 0.0156 x_2; \quad (5)$$

$$y_{46}^2 = -0.1878 y_{16} - 0.2209 y_{26} - 0.4304 y_{36} + 0.1119 y_{56} - 0.0330 y_{66} + \\ + 1.5050 y_6 - 0.1721 y_{41} - 0.1113 y_{42} - 0.2702 y_{43} + 0.0579 y_{44} + \\ + 0.0613 y_{45} - 0.3504 y_{47} - 0.2481 y_{48} + 1.9117 y_{49} + 0.0021 x_2; \quad (6)$$

$$y_{47}^2 = -0.2539 y_{17} - 0.2854 y_{27} - 0.3164 y_{37} + 1.4045 y_{77} + 0.1629 y_{43} - \\ - 0.0795 y_{44} - 0.1156 y_{45} - 0.0864 y_{46} - 0.2577 y_{48} + 1.3507 y_{49} + 0.0177 x_2; \quad (7)$$

$$y_{57}^2 = -0.2438 y_{17} - 0.3136 y_{27} - 0.3538 y_{37} - 0.0454 y_{47} + 0.0319 y_{67} + \\ + 1.4057 y_{77} + 0.7053 y_{51} - 0.2203 y_{52} + 0.2659 y_{53} - 0.3678 y_{54} - \\ - 0.3161 y_{58} + 0.7690 y_{59} - 0.0046 x_2; \quad (8)$$

$$y_{45}^3 = -0.2022 y_{15} - 0.2056 y_{25} - 0.4028 y_{35} - 0.0060 y_{65} + 1.4005 y_{75} - \\ - 0.2292 y_{41} - 0.2623 y_{42} - 0.2062 y_{43} - 0.2133 y_{44} + 0.0705 y_{46} - \\ - 0.3771 y_{48} + 2.0083 y_{49} + 0.0066 x_3. \quad (9)$$

Значения статистических оценок полиномов (2) – (9) приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2

Номер полинома	$S_1^2$	F1	R
2	0.14179	7.07129	0.85858
3	0.18462	5.43081	0.81587
4	0.19873	5.04513	0.80179
5	0.16198	6.21701	0.83915
6	0.19625	5.13148	0.80512
7	0.19543	5.15296	0.80594
8	0.16239	6.20151	0.83875
9	0.14571	6.91244	0.85533

Поскольку полиномы (2) – (9) описывают процесс генерации биоэлектрической активности полей неокортекса в диапазоне  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ -ритмов, то они отражают статические ассоциативные связи, возникающие между функциональными участками коры под влиянием внешних воздействий. Сила и направленность этих

связей характеризуется знаками и значениями оценок коэффициентов регрессии  $b_{ij}$  и значений  $t$ -критерия значимости для каждой оценки.

Из анализа полученных данных можно сделать следующие выводы: в процессе получения и обработки сенсорной информации корой головного мозга статические ассоциативные связи возникают при участии всех исследуемых образований неокортекса, т. е. обработка внешнего сигнала любой модальности происходит с использованием возможностей всех полей, независимо от их функциональности.

**Заключение.** Статистическое моделирование реакций новой коры головного мозга человека на внешние раздражители, отраженное полученными регрессионными полиномами, определяет научную новизну данной работы, т.е. позволяет прогнозировать реакцию человека, перенося ее на адекватное поведение интеллектуальных систем и роботов. Практическое значение данной работы заключается в том, что закономерности совместной работы функциональных полей неокортекса в процессе восприятия и обработки сигнальной информации, отраженные регрессионными полиномами (2) – (9), могут быть использованы при прогнозировании формирования ассоциативных связей в коре головного мозга человека, что может быть учтено при построении систем технического очувствления робота.

1. *Ноф Ш.* Справочник по промышленной робототехнике. – М.: Машиностроение, 1989. – 235 с.
2. *Шмидт Р., Тевс Г.* Физиология человека. – М.: Мир, 1996. – 387 с.
3. *Жадин Н.М.* Биофизические механизмы формирования электроэнцефалограммы – М.: Наука, 1984. – 124 с.
4. *Robert Braham.* Toward an Artificial Eye // IEEE Spectrum. – 1996. – N 5. – P. 21–29.

Получено 20.08.2005