

ПРОБЛЕМЫ БИОНИКИ

Республиканский
межведомственный
тематический
научно-технический
сборник

ВЫПУСК 14

ИЗДАТЕЛЬСКОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ «ВИЩА ШКОЛА»
ИЗДАТЕЛЬСТВО ПРИ ХАРЬКОВСКОМ
ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

Харьков—1975

Сборник посвящен моделированию процессов переработки информации на различных уровнях нервной системы. Рассматриваются нейронные и психические структуры, их взаимосвязь с математическими структурами, возможные критерии организации систем различной природы, согласование элементов и критерии целостности систем, проблемы переработки словесной информации, распознавания зрительных образов, математические и физические модели, воспроизводящие функциональные и структурные особенности анализаторов нервной системы. Описаны бионические устройства обработки пространственно-временных сигналов.

Предназначен для научных работников и специалистов.

Редакционная коллегия:

проф. Ю. П. Шабанов-Кушнарченко (отв. редактор), доц. В. Г. Червов (зам. отв. редактора), проф. А. В. Дабагян, чл.-кор АМН СССР Н. М. Амосов, проф. А. А. Волков, доц. Е. П. Путьшин, д-р биол. наук К. А. Иванов-Муромский, доц. В. А. Грабина, доц. А. Г. Мурашко, доц. Ю. П. Бугай (отв. секретарь).

Адрес редакционной коллегии:

Харьков, ГСП-218, пр. Ленина, 14,
Институт радиоэлектроники

Редакция естественнонаучной литературы
И. о. зав. редакцией А. Ф. Роскопыт

А. Б. КОГАН, д-р биол. наук,
В. Н. ЕФИМОВ, канд. биол. наук,
А. В. КЛИМЕНКО

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В НЕЙРОННЫХ АНСАМБЛЯХ. СООБЩЕНИЕ 1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТДЕЛЬНОГО НЕЙРОНА

Современная нейрофизиология располагает достаточным количеством сведений о динамических свойствах нейронных структур и о переходных процессах, протекающих в ответ на афферентные сигналы. Большинство экспериментов, поставленных по типу стимул — реакция, проводится в целях выявления вида реакции отдельных нейронов и их совокупностей.

В ответ на включение света нейроны зрительной коры чаще всего обнаруживают так называемый физический тип реакции или же колебательное движение в системе [1, 2]. В то же время часть нейронов реагирует тонически. Переходный процесс при такой реакции может рассматриваться как аперiodический. В других опытах [3] при включении стимуляции локомоторной области мозга кошки активность нейронов продолговатого мозга, соответствующая эффекту поднятия лапы животного, медленно нарастает, что свидетельствует о почти линейном поступательном движении в системе. В нейронах дыхательного центра [4, 5] активность клеток имеет ритмический залповый характер, синхронный дыхательным растяжениям легких. Это периодическое автоколебательное движение в системе.

Можно считать, что в нервных механизмах реализуются практически все виды движений, известных в теории динамических систем. Действительно, мозг представляет собой сложную динамическую систему, обеспечивающую и направляющую работу ряда регуляторных подсистем. Одно из их характерных свойств, особенно четко проявляющееся на уровне эффекторных, исполнительных механизмов, — сравнительно большая длительность переходных процессов тонического типа (плавные движения мышечного аппарата) или же значительные периоды колебательных процессов (ритм дыхательной системы, работа механизма шагания и др.). При этом предполагается, что в основе нервных управляющих систем лежит нейрон — элемент относительно быстродействующий. Естественно, возникает вопрос о принципах организации нейронных структур, реализующих подобные движения.

В соответствии с развиваемым в последнее время представлением о вероятностно-статистической организации нервных меха-

низмов [7, 6] предполагается, что они строятся из вероятностных нейронных ансамблей как элементарных функциональных звеньев системы. Мы не располагаем сведениями о характере или виде передаточных функций отдельного нейронного ансамбля. Однако экспериментальные данные о динамических проявлениях нервных механизмов согласно этому представлению относятся к системе нейронных ансамблей и соответственно могут быть использованы для изучения принципов как внутриансамблевой организации нейронов, так и совокупностей ансамблей. В связи с этим представляет интерес теоретически исследовать динамические свойства мозаичных систем нейронных ансамблей для определения их возможностей реализовать те переходные процессы, которые наблюдаются в экспериментах.

Использование методов моделирования всегда предполагает известную идеализацию задачи и, в частности, учет лишь ограниченного перечня свойств нервной клетки. Очевидно, что функциональные возможности нейроноподобной структуры и ее динамические особенности могут существенно меняться в зависимости от вида характеристик реального нейрона, положенных в основу элемента сети. В то же время эффективность исследования нервных механизмов путем моделирования зависит не только от того, насколько целесообразно произведена минимизация учитываемых свойств отдельного нейрона, но и от способа его алгоритмического описания.

Алгоритмы работы динамической аналоговой модели нейрона

Существует достаточное многообразие моделей нейронов и нет необходимости увеличивать это многообразие за счет каких-то схемных и конструктивных решений. Цель настоящего раздела — рассмотреть для нейроноподобного элемента такой способ его алгоритмического описания, который, по нашему мнению, наиболее удобен и эффективен при анализе динамики нейронных сетей.

При построении динамических моделей (реализованных в виде электронных схем либо машинных алгоритмов [8, 9, 10]) нейрон обычно представляется как устройство, преобразующее дискретные импульсные потоки в аналоговую величину, которая затем преобразуется в дискретную выходную активность. Первое преобразование производится входным устройством, которое осуществляет пространственную и временную суммирование входящих импульсных воздействий, а второе — управляемым генератором импульсов, имеющим нелинейную пороговую характеристику. В такой модели учитываются самые основные свойства нейрона неадаптивного типа.

Будем рассматривать дискретную импульсную активность лишь как средство передачи непрерывной информации от одной части нейронной сети к другой. При этом, несмотря на импульс-

ный характер активности нейронных элементов, система в целом функционирует непрерывно и обладает способностью отображать непрерывность окружающего макромира. Такой подход позволяет использовать для аналитического описания динамических моделей аппарат и приемы теории автоматического регулирования, в частности метод передаточных функций.

Входными и выходными переменными модели являются непрерывные функции — интенсивности импульсных потоков или же мгновенные частоты, а элемент осуществляет некоторое преобразование над этими переменными в соответствии со своей передаточной функцией.

Входное устройство модели нейрона. Придерживаясь принятого способа его моделирования, будем считать, что постсинаптические потенциалы возникают в результате заряда емкости мембраны токами, появляющимися при действии входящих к синапсам импульсов (рис. 1, а). Пространственная суммация осуществляется в такой модели линейно вследствие падения напряжения на общем для всех входов сопротивлении r . Таким образом, суммарный потенциал должен быть пропорционален числу активных возбуждающих входов. Тормозные входы, наоборот, уменьшают выходной потенциал. Эффективность каждого волокна (вес входа) фиксирована и определяется в схеме значением соответствующего весового сопротивления R_i .

Для выяснения особенностей временной суммации исследуем переходный процесс на выходе интегрирующей входной цепи (рис. 1, б) при подаче ступенчатого воздействия. С учетом выбранных нами переменных такому воздействию соответствует ситуация, при которой в момент времени $t = 0$ на вход был подан импульсный поток с постоянной частотой $\chi = \frac{1}{T}$. Начало первого импульса совпадает с моментом $t = 0$. При $t = 0$ импульсы на вход не поступали, т. е. $X = 0$. Импульсы прямоугольной формы имели постоянную длительность δ и амплитуду E .

Определим напряжение U_n^0 на конденсаторе к моменту $t = nT$ окончания n -го периода. Процесс заряда и разряда емкости описывается соответственно уравнениями

$$U_3(t) = \alpha E \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_3}} \right) + U_i^0 e^{-\frac{t}{\tau_3}}; \quad (1)$$

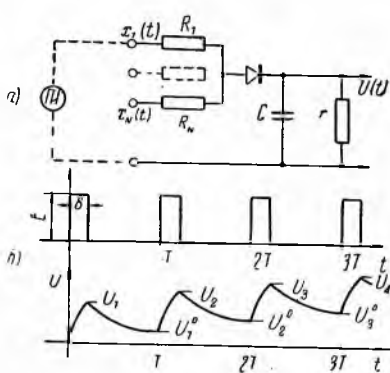


Рис. 1.

$$U_p(t) = U_{i+1} e^{-\frac{t}{\tau_p}},$$

где α — коэффициент пропорциональности, зависящий от сопротивления R и r ;

$\tau_a = \frac{1}{a}$; $\tau_p = \frac{1}{b}$ — постоянные времени заряда и разряда емкости;

U_i^0, U_{i+1} — начальные напряжения на конденсаторе к моменту поступления и концу действия $i + 1$ -го импульса соответственно.

Обозначим для удобства записи

$$L = e^{-a\delta}; \quad N = e^{-b(T-\delta)}. \quad (2)$$

Чтобы вывести результирующий потенциал на емкости, с учетом (1) используем индуктивную схему

$$U_0^0 = 0;$$

$$U_1 = \alpha E (1 - L);$$

$$U_1^0 = \alpha E (1 - L) N = U_1 N;$$

$$U_2 = U_1 + U_1 N L = U_1 (1 + LN); \quad (3)$$

$$U_2^0 = U_1^0 (1 + LN);$$

$$\dots \dots \dots$$

$$U_n^0 = U_1^0 (1 + LN + L^2 N^2 + \dots + L^{n-1} N^{n-1});$$

$$U_{n+1} = U_1 (1 + LN + L^2 N^2 + \dots + L^n N^n).$$

Полученный ряд есть сходящаяся геометрическая прогрессия, так как ее знаменатель меньше единицы, т. е. $LN < 1$. Следовательно, к моменту времени $t = nT$ потенциал на емкости будет определяться выражением

$$U_n^0 = \frac{U_1^0}{1 - LN} (1 - L^n N^n), \quad (4)$$

или с учетом $n = \frac{t}{T}$

$$U_n^0 = U_{уст}^0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right). \quad (5)$$

Таким образом, динамическая составляющая переходного процесса представляет собой экспоненту с постоянной времени

$$\tau = \frac{\tau_a \tau_p}{x\delta (\tau_p - \tau_a) + \tau_a}. \quad (6)$$

Из этого выражения следует, что постоянная времени τ зависит от параметров как входной цепи (τ_a, τ_p), так и входного воздействия x, δ . В частности, в зависимости от частоты импульсации x постоянная τ меняется в пределах от $\tau = \tau_p$ при $x = 0$ до $\tau = \tau_a$ при предельном значении частоты $x = \frac{1}{\delta}$.

По окончании переходного процесса потенциал на выходе суммирующей цепи достигает установившегося состояния и имеет при этом форму пилообразных пульсаций. Минимальное значение на периоде находим из (4):

$$U_{уст}^0 = \frac{U_1^0}{1 - LN}. \quad (7)$$

Аналогично получены выражения для максимального и среднего на периоде значения установившегося потенциала:

$$U_{уст}^0 = \frac{U_1}{1 - LN}; \quad (8)$$

$$\bar{U}_{уст} = \alpha E x \left[\delta - \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right) \frac{(1-L)(1-N)}{1-LN} \right]. \quad (9)$$

Анализ статистических характеристик входного звена модели, построенных на основе формулы (9) (рис. 2, а), показывает, что путем подбора параметров a и b можно существенно изменять вид зависимости суммарного потенциала $U(t)$ от интенсивности входного воздействия $x(t)$. В частности, при $a = b$ может быть получена линейная характеристика звена.

Известно, что реакция вида (5) на ступенчатое воздействие соответствует апериодическому звену первого порядка. Допуская линейность преобразования, определяем передаточную функцию входного устройства модели нейрона в виде

$$W = \frac{k}{\tau p + 1}, \quad (10)$$

где k — эквивалентный коэффициент усиления; τp — постоянная времени, характеризующая степень инертности данного звена.

Генераторный блок модели нейрона осуществляет преобразование суммарного потенциала в импульсный поток, модулированный по частоте.

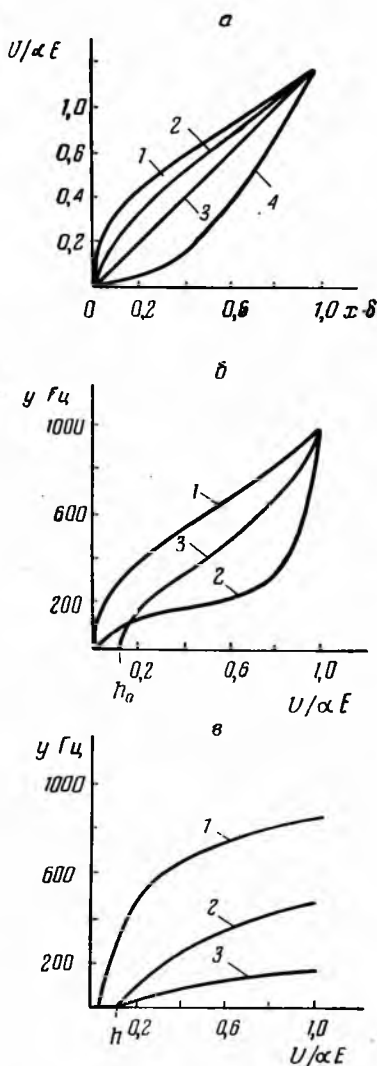


Рис. 2.

В общем случае для управляемого по частоте генератора импульсов релаксационного типа справедливо следующее условие: импульс на выходе генератора появляется при сравнении двух функций

$$F(t) - H(t) = 0, \quad (11)$$

$F(t)$ и $H(t)$ описывают развитие во времени некоторых процессов в рассматриваемом генераторе. Одна из них, например $F(t)$, существенно зависит от управляющего сигнала $U(t)$; другая — $H(t)$, называемая пороговой функцией, определяется собственными параметрами генератора. В зависимости от законов изменения этих функций, их связи между собой получим различные передаточные характеристики генераторного звена нейрона.

В данной работе рассмотрены два частных случая, когда $F(t)$ и $H(t)$ не связаны функциональной зависимостью.

Принцип динамического порога. В этом случае будем считать, что $F(t)$ является непосредственно функцией управляющего потенциала $F(t) \equiv U(t)$, где $U(t)$ — непрерывная функция времени, ограниченная сверху некоторой величиной $U(t) \leq H$. В процессе генерации импульсов значение порога $h(t)$ меняется по следующему алгоритму. В течение длительности импульса δ порог $h(t) > H$. С момента окончания импульса он начинает уменьшаться по экспоненте от H до исходного уровня h_0 (порог покоя).

С учетом условия (11) получена зависимость частоты импульсов на выходе $y(t)$ от управляющего потенциала $U(t)$:

$$y = \frac{1}{\delta - \tau_c \ln \frac{U - h_0}{H - h_0}}, \quad (12)$$

где τ_c — постоянная времени спада пороговой функции.

На рис. 2, б' приведены статические характеристики звена, построенные по формуле (12) при различных значениях τ_c и h_0 . При $U(t) < h_0$ импульсы на выходе будут отсутствовать ($y = 0$). Следовательно, такой генератор является нелинейным функциональным звеном, имеющим зону нечувствительности с порогом, равным h_0 .

Принцип интегральной оценки. Для данного случая допускается, что значение пороговой функции с течением времени не изменяется: $h(t) = h$. Кроме того, принимается, что $F(t)$ представляет собой функцию накопления, являющуюся интегральной оценкой того или иного вида от управляющего сигнала $U(t)$. В соответствии с данным принципом работы генератора импульс на выходе нейрона возникает в момент t_2 , если за время, прошедшее с момента t_1 появления предыдущего импульса, интеграл $F(t)$ достиг пороговой величины (формула (11)). За время длительности импульса δ функция накопления $F(t)$ сбрасывается до нуля, после чего вновь начинается интегрирование входного сигнала. Таким образом, момент появления импульса на выходе

определяется скоростью нарастания функции $F(t)$, которая зависит от среднего значения управляющего потенциала на интервале времени между соседними импульсами.

Для идеального случая линейного интегрирования, когда

$$F(t) = \int_{t_1}^{t_2} U(t) dt,$$

зависимость частоты импульсов от управляющего напряжения имеет линейный вид:

$$y(t) = U(t) \frac{1}{h}. \quad (13)$$

При неидеальном интегрировании (типа RC-цепи) данная зависимость определяется выражением

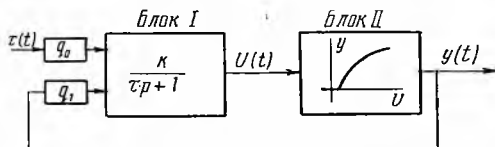


Рис. 3.

$$y(t) = \frac{1}{\delta - \tau_n \ln \left(1 - \frac{h}{U(t)} \right)}, \quad (14)$$

где τ_n — постоянная времени накопительной цепи.

На рис. 2, в показано семейство характеристик $y = \varphi(U)$, рассчитанных по формуле (14) при различных значениях параметров τ_n и h .

Оба типа рассмотренных генераторов являются нелинейными и безынерционными преобразователями напряжения $U(t)$ в частоту импульсов $y(t)$. В обоих случаях статические характеристики звена имеют зону нечувствительности с порогом h . Существенно и то, что в надпороговой зоне характеристики также нелинейны, и только в частных случаях (формула (13)) могут рассматриваться линейные варианты.

Таким образом, эквивалентную аналоговую модель нейрона в общем случае, независимо от конкретных алгоритмов и параметров ее частей, можно представить в виде структурной схемы (рис. 3), состоящей из двух функциональных блоков. Суммирующий блок I — это апериодическое линейное звено первого порядка с передаточной функцией вида (10); генераторный блок II — безынерционный пороговый элемент, имеющий в надпороговой зоне нелинейную характеристику выпуклого вида.

Динамика функциональной активности одного нейрона с обратной связью

В качестве частного, но весьма наглядного и полезного для дальнейшего анализа случая рассмотрим динамику активности отдельного нейрона, замкнутого жесткой обратной связью с весовым коэффициентом q_1 при подаче на его вход с весом q_0

ступенчатого воздействия $x(t)$. Анализ произведен методом преобразования Лапласа и фазовой плоскости, которые при сравнительно несложных выкладках дают легко обозримое решение.

В подпороговом режиме работает лишь первое аperiodическое звено элемента, выдающего известную экспоненциальную переходную функцию. В надпороговом состоянии на выходе появляется сигнал $y(t)$, и таким образом включается в работу цепь обратной связи. Решение здесь и далее будем искать относительно

промежуточной переменной $U(t)$ (а не выходной $y(t)$), поскольку при этом виден весь процесс, включая подпороговые состояния.

Дифференциальное уравнение в операторной форме, описывающее динамику системы в случае линейной характеристики, имеет вид

$$(\tau p + 1)U = k(q_0 x + q_1 y), \quad (15)$$

где k — коэффициент усиления первого звена;

τ — его постоянная времени;

$p = \frac{d}{dt}$ — оператор дифференцирования.

Нелинейность второго звена аппроксимируем ломаной линией с прямолинейными отрезками (рис. 4, а). Зависимость между переменными y и U для r -го отрезка определяется выражением

$$y = k_r(U - h_r) + y_r \quad \text{при } h_r \leq U < h_{r+1}, \quad (16)$$

где k_r , h_r — угловой коэффициент и порог (граничная точка) для данного участка;

y_r — значение выходной переменной в начальной точке отрезка при $U = h_r$, которое выражается через параметры предшествующих отрезков характеристики:

$$y_r = \sum_{m=2}^r k_{m-1}(h_m - h_{m-1}). \quad (17)$$

Подставляя (16) в уравнение (15), получаем

$$(\tau p + 1 - kq_1 k_r)U = kq_0 x + kq_1 y_r - kq_1 k_r h_r.$$

Обозначим для удобства $a_r = kq_1 k_r$ — обобщенный коэффициент связи, или коэффициент передачи разомкнутого контура; $X = kq_0 x$ — входное воздействие; $H_r = kq_1 k_r h_r$ — член, зависящий от пороговых значений и коэффициентов предшествующих участ-

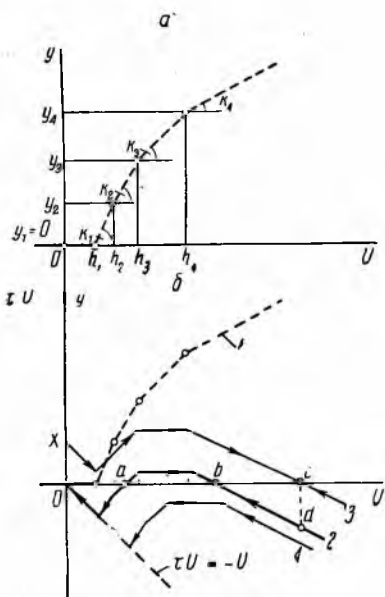


Рис. 4.

ков характеристики. В результате запишем уравнение динамик системы:

$$(\tau p + 1 - a_r)U = X + H_r. \quad (18)$$

Учитывая, что производная $\dot{U} = Up$, из (18) получим уравнение фазовой линии для r -го участка характеристики, которое позволяет проанализировать поведение данной системы при различных значениях параметров ее звеньев:

$$\tau \dot{U} = -U(1 - a_r) + X + H_r. \quad (19)$$

Фазовую траекторию в целом удобно строить, пользуясь обобщенной характеристикой элемента, полученной из (16) с учетом (17) путем перемножения на kq_1 (рис. 4, б):

$$\bar{y} = Ua_r + H_r. \quad (20)$$

Очевидно, что фазовая траектория (19) получается из обобщенной характеристики (20) путем суммирования последней с прямой $y = X - U$ и заменой оси y на ось $\tau \dot{U}$ (рис. 4, б). На этом же рисунке представлена обобщенная характеристика элемента (кривая 1) и несколько фазовых траекторий, из которых кривая 2 показывает траекторию движения системы при нулевом входном воздействии. Подача входного воздействия X приводит (в соответствии с уравнением (19)) к подъему всей линии на величину X (кривая 3). При этом точка, изображающая состояние системы, движется вправо по траектории 3 вплоть до пункта С — точки устойчивого установившегося состояния. При отключении входного возбуждения X движение системы происходит по траектории 2 из точки a влево до точки b , которая также является устойчивой. Следовательно, такой нелинейный нейрон, замкнутый положительной обратной связью, при снятии входного сигнала остается в возбужденном состоянии $U = b$ — эффект, аналогичный гистерезису. Для снятия этого остаточного возбуждения и возвращения нейрона в нулевое состояние необходимо подать на него такое тормозное воздействие, чтобы вся траектория опустилась ниже оси OU .

Точка a на кривой 2 является неустойчивой. Если в момент отключения входных воздействий потенциал U нейрона будет меньше a , то элемент возвратится в исходное нулевое состояние. В противном случае изображающая точка скатится в пункт b и нейрон останется возбужденным.

Особые точки образуются при пересечении траектории с осью U . Наличие таких точек зависит от параметров характеристики элемента. Так, при увеличении начального порога h_1 траектория смещается вниз по линии $\tau \dot{U} = -U$ и уже не образует особых точек (кривая 4). При уменьшении обратной связи q_1 уменьшаются угловые коэффициенты на обобщенной характеристике и соответственно кривая траекторий также смещается вниз.

Время переходного процесса определяется скоростью движения изображающей точки, т. е. величиной ординат $\tau \dot{U}$ фазовой траектории. На участке, где обобщенный коэффициент равен единице (участок $[h_3 \div h_4]$ на кривой \mathcal{Z}) траектория параллельна оси, т. е. скорость процесса постоянна. При снятии возбужденного состояния нейрона может быть подобрано такое входное воздействие, при котором данный участок приблизится снизу к оси абсцисс на сколь угодно малое расстояние. В этом случае скорость движения будет минимальна и соответственно время переходного процесса будет большим. Однако при возбуждении нейрона из нулевого состояния входной сигнал X должен превышать начальный порог h_1 , фазовая кривая при этом значительно поднимается над осью U , и, таким образом, время нарастания возбуждения элемента не может быть сделано большим. Отсюда, в частности, следует невозможность получения интегрирующего звена с большим временем интегрирования на нейронах с нелинейной характеристикой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Юнг Р. Теория связи в сенсорных системах. М., «Мир», 1964. 416 с.
2. Заркешев Э. Г., Силаков В. Л. Общие свойства переходных процессов в активности нейронов различных структур мозга. — В кн.: Некоторые проблемы биологической кибернетики. Л., «Наука», 1972, с. 43—48.
3. Орловский Г. Н. Работа ретикуло-спинальных нейронов при локомоции. — «Биофизика», 1970, т. XV, вып. 4, с. 85—92.
4. Baumgarten R. Koordinationsformen einzelner Ganglienzellen der rhombencephalen Atemzentren. — «Pfl. Arch.», 1956, Bd. 262.
5. О моделировании механизма генерации дыхательного ритма. — «Биофизика», 1969, т. XIV, вып. 4, с. 121—126. Авт.: А. Б. Коган, В. Н. Ефимов, А. А. Чумаченко, В. А. Сафонов.
6. Коган А. Б. О некоторых принципиальных особенностях организации и свойств информационного аппарата мозга. — В кн.: Проблемы нейрокибернетики. Ростов н/Д., Изд-во Рост. ун-та, 1962, с. 7—10.
7. Коган А. Б. Об организации нервных клеток в нейронные ансамбли. — В кн.: Современные проблемы нейрокибернетики. Л., «Наука», 1972, с. 9—18.
8. Позин Н. В. Моделирование нейронных структур. М., «Наука», 1970. 230 с.
9. Казимиров Э. К. Модель промежуточного нейрона. — В кн.: Бионика. М., «Наука», 1965, с. 123—125.
10. Шамис А. Л. Модель нейронной сети с управляемой залповой авторитетической активностью. — В кн.: Кибернетические аспекты в изучении работы мозга. М., «Наука», 1970, с. 37—48.

УДК 62.506.2

Ю. И. ЗОЗУЛЯ

СОГЛАСОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ И ТЕХНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И СИСТЕМ

На пути к изучению естественных и искусственных самоорганизующих систем одной из наиболее сложных представляется задача о согласовании частей целостной бионической системы,

включающей в себя как биологические, так и технические элементы и системы. Сложность этой задачи состоит в определении необходимых и достаточных условий согласования, при которых достигается единство качественно различных частей целостной бионической системы.

В современной литературе по теории систем анализируется в основном согласование (координирование) целей [1] и «положительных результатов» [2] деятельности отдельных частей целостной системы. При этом предполагается, что функции подсистем сложной биологических и технических систем, обладающих иерархической структурой, «наиболее естественно интерпретируются как поиск и принятие решений» [1, с. 101]. В результате эти подсистемы рассматриваются как решающие системы (системы принятия решения), для которых достаточно точно должны быть определены решаемые задачи. Применительно к бионическим системам выполнение последнего требования вызывает значительные трудности, поскольку число разнокачественных элементов в таких системах велико и решаемые ими задачи пока не удается априорно достаточно четко сформулировать, чтобы провести направленный эксперимент для определения конкретных параметров этих задач.

Более продуктивным в данном отношении является подход к описанию сложных систем с помощью соотношений «вход — выход». В рамках этого подхода, опираясь на метод многоуровневого анализа нелинейных динамических систем [3] или метод группового учета аргумента [4], можно с необходимой степенью точности определить параметры соотношений «вход — выход», представляемых априорно в наиболее общей интегральной форме.

Поскольку «всякая система, формализованная посредством моделей «вход — выход», может быть представлена в виде решающей системы, и наоборот» [1, с. 101], условия согласования в виде ограничений на соотношения «вход — выход» согласуемых подсистем могут дополнить условия согласования целевых функций (функций качества) этих подсистем [1] и позволят выработать достаточно гибкий общий метод согласования биологических и технических элементов и систем.

Условия согласования

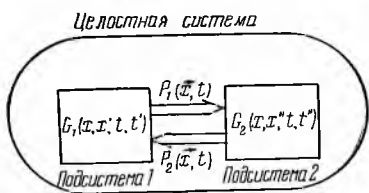
Существует множество синонимов понятия согласование: единство, гармония, координация, консолидация, дуальная взаимозависимость, взаимодействие, взаимное дополнение, взаимная компенсация, взаимопонимание и др. [1, 2, 5]. Во всех этих синонимах без исключения отражен взаимный, симметричный характер процесса согласования частей целого. Между частями объекта существует взаимное соответствие, они дополняют друг друга до единого целого, т. е. существует симметрия частей относительно целого.

Для любой фиксированной части объекта остальные части являются дополнением, поэтому условия согласования подсистем единой целостной системы можно изучить на примере наиболее простой системы, состоящей из двух подсистем (см. рисунок). Взаимодействуя, они образуют один замкнутый контур, по которому циркулируют сигналы. Преобразования сигналов, которые осуществляют эти подсистемы, можно описать в общем виде нестационарной интегральной формой [3]

$$P_1(\vec{x}, t) = \iiint_{R^3} \int_{-\infty}^t G_1(\vec{x}, \vec{x}', t, t') P_2(\vec{x}', t') dt' d\vec{x}'; \quad (1)$$

$$P_2(\vec{x}, t) = \iiint_{R^3} \int_{-\infty}^t G_2(\vec{x}, \vec{x}'', t, t'') P_1(\vec{x}'', t'') dt'' d\vec{x}'', \quad (2)$$

где $P_1(\vec{x}, t)$, $P_2(\vec{x}, t)$ — входные и выходные сигналы; $G_1(\vec{x}, \vec{x}'$,



$t, t')$, $G_2(\vec{x}, \vec{x}'', t, t'')$ — функции влияния (ядра) нестационарных математических моделей нелинейных подсистем. Тогда исследование взаимного соответствия и симметрии между согласуемыми подсистемами может быть сведено к изучению такого соответствия и

симметрии между интегральными преобразованиями (1) и (2).

Подставив (2) в (1) и выполнив простые преобразования, получим соотношение

$$P_1(\vec{x}, t) = \iiint_{R^3} \int_{-\infty}^t \left[\iiint_{R^3} \int_{-\infty}^t G_1(\vec{x}, \vec{x}', t, t') G_2(\vec{x}', \vec{x}'', t', t'') dt' d\vec{x}'' \right] \times P_1(\vec{x}'', t'') dt' d\vec{x}'. \quad (3)$$

Это равенство выполняется при любых $P_1(\vec{x}, t)$, если

$$\begin{aligned} \iiint_{R^3} \int_{-\infty}^t G_1(\vec{x}, \vec{x}', t, t') G_2(\vec{x}', \vec{x}'', t', t'') dt' d\vec{x}' &= \\ &= \delta(\vec{x} - \vec{x}'') \delta(t - t''). \end{aligned} \quad (4)$$

При этом между преобразованиями (1) и (2) устанавливаются взаимно-однозначное соответствие и симметрия относительно тождественного преобразования. Условие (4) может быть выполнено только в том случае, если

$$\begin{aligned} G_1(\vec{x}, \vec{x}', t, t') &= G_1(\vec{x}, \vec{x}', t) \delta(t - t'); \\ G_2(\vec{x}, \vec{x}'', t, t'') &= G_2(\vec{x}, \vec{x}'', t) \delta(t - t'') \end{aligned} \quad (5)$$

$$\iiint_{R^3} G_1(\vec{x}, \vec{x}', t) G_2(\vec{x}', \vec{x}'', t) d\vec{x}' = \delta(\vec{x} - \vec{x}''), \quad (6)$$

поскольку при $t'' \rightarrow t$ путем интегрирования в левой части соотношения (4) по множеству меры нуль необходимо получить значение, отличное от нуля.

Из (5) следует, что симметрия преобразований (1) и (2) относительно тождественного требует безынерционности согласуемых подсистем. Это условие может быть выполнено лишь при согласовании биологических и технических систем, обладающих образной памятью, поскольку каждая из них может компенсировать свою инерционность за счет предсказания поведения другой системы, с которой она согласуется. Для подсистем, не имеющих образной памяти, необходимо ослабить требование (4), рассматривая симметрию согласуемых подсистем с точностью до сдвига во времени (задержки) t_3 :

$$\iiint_{R^3} \int_{t''}^t G_1(\vec{x}, \vec{x}', t, t') G_2(\vec{x}', \vec{x}'', t', t'') dt' d\vec{x}' = \delta(\vec{x} - \vec{x}'') \delta(t - t' - t_3). \quad (7)$$

Тогда для сигналов, циркулирующих в контуре, образованном согласованными подсистемами, запишем уравнения

$$P_1(\vec{x}, t) = P_1(\vec{x}, t - t_3); \quad (8)$$

$$P_2(\vec{x}, t) = P_2(\vec{x}, t - t_3),$$

которые указывают на периодический характер этих сигналов.

Таким образом, согласование инерционных подсистем без образной памяти сводится к образованию на их основе осциллятора, или колебательного контура. Обратно, целостная система, состоящая из согласованных инерционных подсистем без образной памяти, является осциллятором. В этом случае

$$G_1(\vec{x}, \vec{x}', t, t') = G_1(\vec{x}, \vec{x}', t) \delta(t - t' - t_1); \quad (9)$$

$$G_2(\vec{x}, \vec{x}'', t, t'') = G_2(\vec{x}, \vec{x}'', t) \delta(t - t'' - t_2); \quad t_1 + t_2 = t_3.$$

Достаточное количество примеров таких целостных систем рассмотрено в физике.

Анализ условий согласования

Условия (4) и (7) связывают функции влияния математических моделей согласованных систем. Дальнейший анализ этих условий сводится к изучению соотношения (6), устанавливающего связь между пространственными компонентами функций влияния, т. е. к исследованию класса функций, удовлетворяющих (6).

Известно, что преобразование Фурье устанавливает взаимно-однозначное соответствие между обобщенными функциями медленного роста [6, с. 136], так что

$$\delta(\vec{x} - \vec{x}') = \iint_{R^3} \int e^{-2\pi i \sum_{m=1}^3 (x_m - x'_m) x'_m} d\vec{x}'. \quad (10)$$

Это соотношение сохраняется при произвольном линейном преобразовании переменных интегрирования

$$\begin{aligned} & \delta(\vec{x} - \vec{x}') = \\ & = \iiint_{R^3} \prod_{m=1}^3 \alpha_m(\vec{x}, \vec{x}', t) e^{-2\pi i (x_m - x'_m) [\alpha_m(\vec{x}, \vec{x}', t) x'_m + \beta_m(\vec{x}, \vec{x}', t)]} d\vec{x}'. \quad (11) \end{aligned}$$

Разделяя подынтегральное выражение на две компоненты при $\alpha_m(\vec{x}, \vec{x}', t) = \alpha_m(t)$, $\beta_m(\vec{x}, \vec{x}', t) = \beta_m(\vec{x}, t) + \beta_m(\vec{x}', t)$, получаем уравнение, аналогичное (6):

$$\begin{aligned} \delta(\vec{x} - \vec{x}') & = \iiint_{R^3} \prod_{m=1}^3 \left\{ \sqrt{\alpha_m(t)} e^{-2\pi i [\alpha_m(t) x_m x'_m + x_m \beta_m(\vec{x}, t)]} \right\} \times \\ & \times \prod_{m=1}^3 \left\{ \sqrt{\alpha_m(t)} e^{2\pi i [\alpha_m(t) x'_m x'_m + x'_m \beta_m(\vec{x}', t)]} \right\} d\vec{x}'. \quad (12) \end{aligned}$$

Его можно обобщить, если умножить или разделить под интегралом каждую из компонент на одинаковую функцию:

$$\begin{aligned} \delta(\vec{x} - \vec{x}') & = \iiint_{R^3} a(\vec{x}, t) b(\vec{x}', t) e^{-i[\nu(\vec{x}, t) + \mu(\vec{x}', t)]} \times \\ & \times \prod_{m=1}^3 \left\{ \sqrt{\alpha_m(t)} e^{-2\pi i \alpha_m(t) x_m x'_m} \right\} [a(\vec{x}', t) b(\vec{x}, t)]^{-1} \times \\ & \times e^{i[\nu(\vec{x}', t) + \mu(\vec{x}, t)]} \prod_{m=1}^3 \left\{ \sqrt{\alpha_m(t)} e^{2\pi i \alpha_m(t) x'_m x'_m} \right\} d\vec{x}'. \quad (13) \end{aligned}$$

Сопоставив (6) и (13), запишем

$$\begin{aligned} G_1(\vec{x}, \vec{x}', t) & = a(\vec{x}, t) b(\vec{x}', t) e^{-i[\nu(\vec{x}, t) + \mu(\vec{x}', t)]} \times \\ & \times \prod_{m=1}^3 \left\{ \sqrt{\alpha_m(t)} e^{-2\pi i \alpha_m(t) x_m x'_m} \right\}; \quad (14) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_2(\vec{x}', \vec{x}, t) & = [a(\vec{x}', t) b(\vec{x}, t)]^{-1} e^{i[\nu(\vec{x}', t) + \mu(\vec{x}, t)]} \times \\ & \times \prod_{m=1}^3 \left\{ \sqrt{\alpha_m(t)} e^{2\pi i \alpha_m(t) x'_m x'_m} \right\}. \quad (15) \end{aligned}$$

Эти формулы являются обобщением ядер известных интегральных голографических кодов [7], включающих преобразования Фурье и Френеля.

Поскольку функции $\prod_{m=1}^3 [\sqrt{\alpha_m(t)} e^{2\pi i k_m \alpha_m(t) x_m x'_m}]$ образуют ортонормальную тригонометрическую систему, возможно дальнейшее обобщение (14) и (15) путем формирования из них рядов

$$G_1(\vec{x}, \vec{x}', t) = a(\vec{x}, t) b(\vec{x}', t) e^{-i[\nu(\vec{x}, t) + \mu(\vec{x}', t)]} \times \\ \times \prod_{m=1}^3 \left\{ \sum_{k_m=1}^{\infty} c_{k_m}(t) e^{-2\pi i k_m \alpha_m(t) x_m x'_m} \right\}, \quad (16)$$

$$G_2(\vec{x}', \vec{x}'', t) = [a(\vec{x}'', t) b(\vec{x}', t)]^{-1} e^{i[\nu(\vec{x}'', t) + \mu(\vec{x}', t)]} \times \\ \times \prod_{m=1}^3 \left\{ \sum_{k_m=1}^{\infty} c_{k_m}(t) e^{2\pi i k_m \alpha_m(t) x_m x'_m} \right\} \quad (17)$$

при

$$\prod_{m=1}^3 \sum_{k_m=1}^{\infty} \frac{c_{k_m}^2(t)}{k_m \alpha_m(t)} = 1. \quad (18)$$

Последнее требование выполняется, например, в случае преобразования Уолша.

Из преобразований с ядрами (16) и (17) можно сформировать произвольные кратные преобразования вида

$$G_1(\vec{x}, \vec{x}', t) = \iiint_{R^3} \dots \iiint_{R^3} G_{p_1}^1(\vec{x}, \vec{x}''', t) G_{p_2}^2(\vec{x}''', \vec{x}^{IV}, t) \dots \\ \dots G_{p_n}^n(\vec{x}^{n+1}, \vec{x}', t) d\vec{x}'' \dots d\vec{x}^{n+1}; \quad (19)$$

$$G_2(\vec{x}', \vec{x}'', t) = \iiint_{R^3} \dots \iiint_{R^3} G_{q_n}^n(\vec{x}', \vec{x}^{n+1}, t) \dots \\ \dots G_{q_2}^2(\vec{x}^{IV}, \vec{x}'', t) G_{q_1}^1(\vec{x}'', \vec{x}, t) d\vec{x}^{n+1} \dots d\vec{x}', \quad (20)$$

где $p_j, q_j \in \{1, 2\}$, $p_j + q_j = 3$;

$$G_1^j(\vec{x}, \vec{x}', t) = a_j(\vec{x}, t) b_j(\vec{x}', t) e^{-i[\nu_j(\vec{x}, t) + \mu_j(\vec{x}', t)]} \times \\ \times \prod_{m=1}^3 \left\{ \sum_{k_m=1}^{\infty} c_{k_m}^j(t) e^{-2\pi i k_m \alpha_m^j(t) x_m x'_m} \right\}; \quad (21)$$

$$G_2^j(\vec{x}', \vec{x}'', t) = [a_j(\vec{x}'', t) b_j(\vec{x}', t)]^{-1} e^{i[\nu_j(\vec{x}'', t) + \mu_j(\vec{x}', t)]} \times \\ \times \prod_{m=1}^3 \left\{ \sum_{k_m=1}^{\infty} c_{k_m}^j(t) e^{2\pi i k_m \alpha_m^j(t) x_m x'_m} \right\} \quad (22)$$

при

$$\prod_{m=1}^3 \sum_{k_m=1}^{\infty} \frac{c_{k_m}^{2j}(t)}{k_m^{\alpha_m j}(t)} = 1.$$

В частном случае таким способом можно получить однородное интегральное преобразование типа свертки с ядром в виде произвольной шумоподобной функции $G(\vec{x}, t)$:

$$G_1(\vec{x}, \vec{x}', t) = \iiint_{R^3} e^{-2\pi i \sum_{m=1}^3 x_m x_m''} \text{sign}[\sigma(\vec{x}''', t)] \times \\ \times e^{2\pi i \sum_{m=1}^3 x_m x_m'} d\vec{x}''' = G(\vec{x} - \vec{x}', t); \quad (23)$$

$$G_2(\vec{x}', \vec{x}'', t) = \iiint_{R^3} e^{-2\pi i \sum_{m=1}^3 x_m x_m''} \{\text{sign}[\sigma(\vec{x}''', t)]\}^{-1} \times \\ \times e^{2\pi i \sum_{m=1}^3 x_m x_m'} d\vec{x}''' = G(\vec{x}' - \vec{x}'', t); \quad (24)$$

$$\iiint_{R^3} G(\vec{x} - \vec{x}', t) G(\vec{x}' - \vec{x}'', t) d\vec{x}' = \delta(\vec{x} - \vec{x}''), \quad (25)$$

где $\sigma(\vec{x}''', t)$ — произвольная шумоподобная функция;

$$\text{sign}(u) = \begin{cases} 1, & u > 0, \\ -1, & u < 0. \end{cases}$$

В целом соотношения (19)—(22) определяют множество интегральных преобразований с распределенными ядрами. На выходах согласованных подсистем, выполняющих подобные преобразования сигналов, одновременно или с задержкой t_3 можно наблюдать некоторый сигнал и, например, его пространственный Фурье-образ. Такая ситуация возникает при наблюдении различных квантомеханических объектов, например электрона, в результате чего формируются представления о целостной системе (электроне) как о частице и поле одновременно [8].

Системы, осуществляющие интегральные преобразования с распределенными ядрами, обладают высокой надежностью по отношению к неоднородным шумам в связи с тем, что между согласуемыми подсистемами соответственно (4) или (7) устанавливается положительная обратная связь с коэффициентом усиления сигнала в контуре, равным единице. Низкая надежность согласуемых подсистем при наличии положительной обратной связи между ними привела бы к быстрому рассогласованию под-

систем и к разрушению целостной системы. В случае использования подсистем с распределенными функциями влияния для разрушения целостной системы необходимы значительные возмущающие (силовые) воздействия, реализация которых требует значительных энергетических затрат. Особенно это характерно для различных целостных систем микромира и распределенных общественных систем.

Задачей дальнейших исследований является применение найденных условий согласования для анализа возможностей согласования существующих биологических и технических элементов и систем, например нейронной сети мозга человека-оператора и ЭЦВМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. М., «Мир», 1973. 344 с.
2. Анохин П. К. Биология и нейрофизиология условного рефлекса. М., «Медицина», 1968. 547 с.
3. Зозуля Ю. И. Метод многоуровневого анализа нелинейных динамических систем мозга. — В сб.: Проблемы бионики. Вып. 13. Харьков. «Вища школа», 1974, с. 3—14.
4. Ивахненко А. Г. Системы эвристической самоорганизации в технической кибернетике. Киев, «Техніка», 1971. 372 с.
5. Фон Ферстер Г. От стимула к символу: экономия обработки информации в биологических системах. — В кн.: Кибернетические проблемы бионики. Ч. 1-я. Анализ биологических прототипов. М., «Мир», 1971, с. 62—81.
6. Владимиров В. С. Уравнения математической физики. М., «Наука», 1967. 436 с.
7. Зозуля Ю. И. Надежные вычисления при наличии шумов в зрительном анализаторе. — В сб.: Проблемы бионики. Вып. 12. Харьков, «Вища школа», 1974, с. 3—11.
8. Ферми Э. Квантовая механика. М., «Мир», 1968. 367 с.

УДК 62.506.001

А. Г. БОРЗЕНКО, А. В. ДАБАГЯН, д-р техн. наук

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ В НЕЙРОННОЙ СЕТИ, МОДЕЛИРУЮЩЕЙ КОРУ МОЗГА

Изучение функций мозга математическим методом привело к созданию большого числа моделей, которые учитывают ряд возможных свойств нейронов и коры в целом. При моделировании за основу часто принимаются не исследованные детально тонкие свойства нейронов и допускаются предположения о неизвестных сторонах деятельности нейронов. По нашему мнению, более перспективным представляется моделирование на основе сравнительно грубых, но достоверно известных приближенных гипотез о свойствах нейрона.

Описание модели. Модель нейронной сети основывается на следующих постулатах: 1) нейронная сеть состоит из формаль-

ных нейронов; 2) нейронам присуще свойство рефрактерности, причем выход из состояния рефрактерности зависит от момента последнего возбуждения нейрона; 3) непосредственно через свой аксон один нейрон с некоторой вероятностью возбуждает другой нейрон, если последний не находится в состоянии рефрактерности; 4) если нейрон не находится в состоянии рефрактерности, то с некоторой вероятностью он может быть возбужден внешним по отношению к нейронной сети возбуждением; 5) аксоны нейронов осуществляют задержку сигналов; 6) наличие порога чувствительности моделируется тем, что учитываются только надпороговые сигналы; 7) других механизмов взаимодействия нейронов нет.

Кора представляется в виде специализированной нейронной сети, состоящей из однородных макроучастков, связанных друг с другом.

Специализация нейронов и участков определяется числом работающих синапсов внутри и вне макрообласти.

Цель исследования — создать математическую модель распространения возбуждения в нарушенной хирургически и в нормальной коре мозга и получить формулы, дающие количественные характеристики распространения возбуждения, промоделировать хорошо известные экспериментальные факты — специализацию участков коры и возможность восстановления в некоторой мере функций ее разрушенных макроучастков.

Формализация задачи. По своему характеру модель является стохастической. Примем следующие обозначения: N — общее число нейронов в сети; $\sigma_i(t)$ — вероятность того, что i -нейрон возбужден в момент времени t , $i \in I = \{q: q = 1, 2, \dots, N\}$; $\psi(\tau)$ — закон распределения промежутков рефрактерности нейронов; $f_{sp}(\tau)$ — закон распределения времени задержки сигнала от p -нейрона к s -нейрону, $s, p \in I$; a_{sp} — вероятность возбуждения s -нейрона через аксон p -нейрона при условии, что p -нейрон возбужден и s -нейрон не находится в состоянии рефрактерности, $s, p \in I$; b_s — вероятность возбуждения s -нейрона внешним воздействием при условии наличия последнего и ненахождения s -нейрона в состоянии рефрактерности, $s \in I$; D_s — вероятность наличия внешнего возбуждения нейрона в момент времени t , $s \in I$.

Законы распределения промежутков рефрактерности нейрона и времени задержки сигнала аксоном являются законами распределения конечных, положительных, не равных нулю величин. Поэтому можно записать

$$\sigma_k(t) = \left\{ 1 - \int_T^{T_0} \sigma_k(t-\tau) \psi(\tau) d\tau \right\} \left\{ \sum_{p=1}^N a_{kp} \int_T^{T_0} \sigma_p(t-\tau) f_{kp}(\tau) d\tau + b_k D_k(t) \right\}, \quad k \in I. \quad (1)$$

Здесь T, T_0 — некоторые положительные величины. Первая фигурная скобка в формуле (1) является вероятностью ненахождения нейрона в состоянии рефрактерности. Интеграл во второй скобке — вероятность наличия сигнала от p -нейрона на k -нейроне. Разобьем интервал времени $[0, t]$ точками t_i на интервалы $[t_0, t_1], [t_1, t_2], \dots, [t_{n-1}, t_n], [t_n, t_{n+1}]$, где $t_0 = 0, t_{n+1} = t, t_i - t_{i-1} = T_0 (i = 1, \dots, n)$. Из вида формулы (1) ясно, что значения переменных $\sigma_k(t)$ на интервале $[t_{i-1}, t_i]$ можно оценить через значения переменных на интервале $[t_{i-2}, t_{i-1}] (i = 2, \dots, n+1)$. Матрица $A = [a_{sp}]$ как матрица вероятностей является положительной.

Приводимые ниже утверждения сформулированы для случая, когда входящие в систему (1) величины являются вероятностями.

Исследуем поведение решения системы (1) при постоянных возбуждениях, т. е. при $D_k = \text{const}, k \in I$.

Теорема. *Решение системы (1) устойчиво, если*

$$\alpha = \max_s \sum_{p=1}^N a_{sp} < 1.$$

Доказательство. Обозначим

$$x_k(t_i) = \max_{t \in [t_{i-1}, t_i]} \sigma_k(t); \quad y_k(t_i) = \min_{t \in [t_{i-1}, t_i]} \sigma_k(t),$$

$$k \in I.$$

Используя уравнения (1), получаем

$$\max_{t \in [t_i, t_i + T]} \sigma_k(t) \leq \{1 - y_k(t_i)\} \left\{ \sum_{p=1}^N a_{kp} x_p(t_i) + b_k D_k \right\}; \quad (2)$$

$$\min_{t \in [t_i, t_i + T]} \sigma_k(t) \geq \{1 - x_k(t_i)\} \left\{ \sum_{p=1}^N a_{kp} y_p(t_i) + b_k D_k \right\}, \quad k \in I.$$

Отсюда, обозначив $z_k(t_i) = x_k(t_i) - y_k(t_i)$, найдем

$$0 \leq z_k(t_{i+1}) \leq \sum_{p=1}^N a_{kp} z_p(t_i), \quad k \in I$$

и

$$z(t_i) = \max_k z_k(t_i) \leq z(t_{i-1}).$$

Поэтому при $i \rightarrow \infty$ с точностью до бесконечно малых

$$\sigma_k(t) = y_k(t_i) = x_k(t_i) (t \in [t_{i-1}, t_i], k \in I).$$

Из неравенств (2) при $i > M$ (M — положительное целое число) имеем

$$x_k(t_{i+1}) \leq \{1 - \sigma_k(t)\} \left\{ \sum_{p=1}^N a_{kp} \sigma_p(t) + b_k D_k \right\} + o(i);$$

$$y_k(t_{i+1}) \geq \{1 - \sigma_k(t)\} \left\{ \sum_{p=1}^N a_{kp} \sigma_p(t) + b_k D_k \right\} - o(i), \quad k \in I,$$

где $o(i)$ — малая величина, $\lim_{i \rightarrow \infty} o(i) = 0$. Переходя к пределу при $i \rightarrow \infty$, получаем

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \sigma_k(t) = \left\{ 1 - \lim_{t \rightarrow \infty} \sigma_k(t) \right\} \left\{ \sum_{p=1}^N a_{kp} \lim_{t \rightarrow \infty} \sigma_p(t) + b_k D_k \right\},$$

$$t \in [t_{i-1}, t_i], k \in I.$$

Так как

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \sigma_k(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \sigma_k(t) = v_k,$$

то

$$v_k = \{1 - v_k\} \left\{ \sum_{p=1}^N a_{kp} v_p + b_k D_k \right\}, k \in I. \quad (3)$$

Система (3) для $v_k \in [0, 1]$ имеет единственный корень*. Следовательно, асимптотическое решение системы (1) существует в заданном режиме и $\lim_{t \rightarrow \infty} \sigma_k(t) = v_k$, $k \in I$, где v_k — корень системы уравнений (3). Можно показать, что переходный процесс в системе (1) протекает быстрее, чем затухающий экспоненциальный с постоянной времени $T_0 / \ln \alpha^{-1}$.

Следствием теоремы является понижение порядка системы (1) при исследовании асимптотических процессов в коре до числа ее специализированных участков. В самом деле, уравнения для асимптотического состояния нейронов (система 3) будут одинаковы для всех нейронов специализированного участка. Так как математическая однородность участка коры означает, что если S_k и S_p — соответственно множество номеров нейронов k и p участка коры, то

$$a_{ij} f_{ij}(\tau) = a_{kp} f_{kp}(\tau)$$

при

$$j \in S_p, i \in S_k.$$

Очевидно, что $S_p \cap S_k = \emptyset$ при $k \neq p$.

Представим уравнения (3) в матричном виде:

$$V = BV + CD, \quad (4)$$

где $V = [v_k]$ — матрица-столбец;

$B = [(1 - v_k) a_{kp}]$ — квадратная матрица;

$C = [(1 - v_k) b_k]$ — диагональная матрица;

$D = [D_k]$ — матрица-столбец ($k, p \in I$).

Будем последовательно применять формулу (4) к ней же, т. е. $V = B(BV + CD) + CD$ и т. д. После m шагов получим

$$V = \sum_{s=0}^{m-1} B^s CD + B^m V.$$

* Строгое доказательство, полученное нами, не приводится из-за его громоздкости.

Оценим величину $B^m V$ для его произвольного элемента:

$$\sum_{\rho_1=1}^N a_{k\rho_1} (1 - v_k) \left\{ \sum_{\rho_2=1}^N a_{\rho_1\rho_2} (1 - v_{\rho_1}) \{ \dots (1 - v_{\rho_{m-1}}) v_{\rho_m} \} \dots \right\} \leq \\ \leq \max_k v_k (1 - \min_k v_k)^m \alpha^m.$$

Следовательно, справедлива формула

$$V = \sum_{s=0}^{\infty} B^s C D.$$

Предположив, что $L = [B_k]$ — диагональная матрица ($k \in I$), получим окончательную формулу

$$\sum_{s=0}^{\infty} A^s (1 - \max_k v_k)^{s+1} L D < V < \sum_{s=0}^{\infty} A^s (1 - \min_k v_k)^{s+1} L D. \quad (5)$$

Последнее равенство доказывает возможность рассмотрения системы как совокупности макроподсистем.

Степень минимального влияния k -участка коры на p -участок можно определить посредством коэффициента

$$\varphi = (1 - \max_k v_k) a_{kp} + \sum_{s=1}^N (1 - \max_k v_k)^s a_{ks} a_{sp}. \quad (6)$$

ВЫВОДЫ

1. При моделировании коры мозга описанным методом можно без больших погрешностей пренебречь переходными процессами в модели коры, если скорость изменения внешнего воздействия на кору меньше, чем $\ln \alpha^{-1} / 3T_0$, где T_0 — максимальное время задержки сигнала аксонами нейронов коры. В этом режиме нейроны, принадлежащие специализированным участкам коры, можно объединить в группы и рассматривать связи не между нейронами, а между участками коры. При этом вид уравнений не изменяется. Полученные формулы позволяют судить о характере изменения процессов в коре при нарушении части связей между участками коры. Пусть на кору производится некоторое постоянное воздействие. Тогда приблизительный вид распространения возбуждения в коре можно получить по формуле (5). Предположим, что механически нарушена непосредственная связь k и p участков, т.е. a_{kp} становится равным нулю. Однако очевидно, что связь между k и p участками сохраняется, так как минимальный коэффициент связи (формула (6)) все же не равен нулю. Таким образом, хирургическое нарушение непосредственных связей между специализированными участками коры не приводит к полной утрате возможности передачи возбуждения между ними.

2. Описанная математическая модель дает возможность при известных связях между участками коры найти конфигурацию внешнего воздействия, вызывающего заданное возбуждение коры.

3. Созданная математическая модель не противоречит экспериментальным фактам и в достаточной степени отражает процессы, протекающие в реальной коре.

**СВОЙСТВА ОТОБРАЖЕНИЯ И БИОНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ. СООБЩЕНИЕ 3***

Для анализа свойств отображения ранее было введено понятие «пространство отображения» [1]. В этом пространстве различаются объекты трех типов: отображаемые, отображающие и отображаемые. Отмечалось также, что для целей исследования отображающих систем недостаточно разделить объекты и отношения на материальные и идеальные, объективные и субъективные. Необходимо учитывать конкретную природу сосуществующих объектов и переходить к ряду частных форм существования объектов различной природы. Так, в указанном пространстве отображаемыми объектами могут являться материальные предметы (отношения), материализованные идеальные предметы (отношения), отображенные ранее объекты, извлекаемые из памяти в виде соответствующих образов. Непосредственно отображающими могут быть материальные объекты и субъекты, косвенно отображающими — образы предметов и представления о предметах, изменяющиеся под действием других образов или внешних факторов. Наконец, отображенное как результат процесса отображения может существовать в форме образов — как субъективных, так и искусственных, «машинных», представляющих собой целостные образования в отображенном.

Каждой паре качественно различных объектов соответствует своя особая форма сосуществования, характеризующаяся специфическими отношениями и свойствами этих отношений. Однако в задачах отображения возникает необходимость отображать друг на друге множество сосуществующих объектов различной природы. Переход от одной формы существования к другой должен сопровождаться анализом различий отношений и их свойств в первой и второй формах существования.

В задачах отображения рассмотрение конкретной природы объектов приобретает первостепенное значение, так как вообще бессмысленно говорить об адекватности отображаемого и отображенного, не учитывая специфики каждого из них. Но при отсутствии единой основы для классификации и различения разнокачественных объектов и отношений вообще не ясно, как можно сравнивать, например, отображаемое и отображенное.

Анализ различных форм существования и соответствующих отношений необходим для решения и другой актуальной задачи — введения эффективных критериев сложности, уровня организации систем различной природы. В частности, нами используется

* Окончание. Начало см. в сб.: «Проблемы бионики», вып. 12 (Сообщение 1), вып. 13 (Сообщение 2).

предположение о том, что наиболее существенным в характеристике уровня организации любой системы является описание типов отношений (и их свойств) между элементами системы. Система сложнее, если ее элементы разнообразнее и отношения богаче. Существуют системы, отношения между элементами которых таковы, что критерии для оценки сравнительной сложности и возможности взаимного отображения этих систем могут практически отсутствовать.

Любые отношения в пространстве отображения есть частные формы существования вообще. Если воспользоваться способом классификации форм существования, описанным в предыдущих сообщениях, и распространить его на весь класс объектов пространства отображения, то для характеристики какой-либо конкретной формы существования достаточно перечислить все особенности соответствующего отношения. Простой перебор всех возможных комбинаций выделенных свойств отношений приводит к множеству любых мыслимых отношений и форм существования. Однако оказывается, что человек непосредственно использует для характеристики реальных объектов только некоторые формы существования. Большинство соответствующих этим формам существования отношений имеют специальные названия. К ним относятся отношения эквивалентности, обусловленности, причинности, противоречия и др.

Используемый способ классификации позволяет в принятом приближении указать на достаточно четкие отличия одних отношений от других. Далее предполагается, что любые отношения, используемые человеком, в конце концов могут быть полностью охарактеризованы некоторым перечнем свойств соответствующего отношения. Аналогичным образом поступают математики, описывая свойства отношений, вводимых при аксиоматическом построении теории [2, с. 125]. Отличие состоит лишь в том, что, например, в «чистой» математике не интересуются конкретной природой объектов и рассматривают только отношения в «чистом» виде. Построить такой перечень для всех важнейших отношений, вероятно, непросто, если иметь в виду, что многие свойства отношений находятся в области неявных и «неочевидных» предположений о свойствах отношений.

В настоящем сообщении описаны предварительные результаты сравнительного анализа отношений в пространстве отображения.

Характеристические функции отношений

Большинство отношений характеризуется достаточно длинным списком свойств, а результат сравнения отношений также выражается в виде перечня отличительных свойств, присутствующих или отсутствующих у данного отношения. Поэтому дальнейшее описание отношений неудобно проводить в словесной форме. Опишем отношения посредством характеристических функций, используемых в теории множеств [4, с. 144].

Существование объектов любой природы — существование вообще — характеризуется полным набором свойств отношений, образующих множество S . Конкретной форме существования и определяющему ее отношению соответствует частный набор свойств отношений, образующих подмножество $S_k \subset S$. Определим на исходном множестве S характеристическую функцию подмножества S_k свойств некоторого отношения вида

$$\chi_k(\xi) = \begin{cases} 1, & \text{если } \xi \in S_k, \\ 0, & \text{если } \xi \notin S_k, \end{cases}$$

где k — индекс отношения; ξ — некоторое свойство отношения ($\xi \in S$). Упорядочим произвольным образом конкретное множество свойств отношений, используя при этом введенные обозначения для свойств ξ_i . Предполагаем, что в пространстве отображения отношения могут быть: существенными ξ_1 и несущественными ξ_2 , полными ξ_3 и частичными ξ_4 , внутренними ξ_5 и внешними ξ_6 , непрерывными ξ_7 и прерывными ξ_8 , ограниченными ξ_9 и неограниченными ξ_{10} , непосредственными ξ_{11} и косвенными ξ_{12} , односторонними ξ_{13} и взаимными ξ_{14} , постоянными ξ_{15} и непостоянными ξ_{16} , транзитивными ξ_{17} и нетранзитивными ξ_{18} , симметричными ξ_{19} и несимметричными ξ_{20} , рефлексивными ξ_{21} и нерефлексивными ξ_{22} . Другие известные свойства отношений пока не рассматриваются. Как отмечалось в сообщении 1, свойства отношений не определяются, а задаются аксиоматически и лишь поясняются на примерах.

Характеристические функции любых отношений могут быть заданы в виде таблицы

$\xi_1 \xi_2 \xi_3 \xi_4 \xi_5 \xi_6 \xi_7 \xi_8$	ξ_{22}	(1)
1 1 1 1 1 1 1 1	1	(2)
.	
1 1 1 1 0 1 0 1	(3)
.	
0 0 0 0 0 0 0 0	(4)

Здесь элементы первой строки — аргументы характеристической функции, каждому из которых соответствует определенное свойство отношений. Во второй строке приведены значения характеристической функции (χ -функции) универсального отношения, обладающего всеми свойствами и определяющего существование вообще. Введем специальное обозначение χ_1 для этого универсального отношения. В третьей строке дан пример описания некоторого конкретного отношения, для которого χ -функция обращается в нуль при значениях аргументов ξ_6 и ξ_7 , т. е. отношение является для объектов внешним (не внутренним) и прерывным (не непрерывным). В четвертой строке формально описано отношение, не имеющее ни одного свойства. Обозначим χ -функцию этого отношения через χ_0 . Все реальные отношения могут быть описаны путем добавления некоторых признаков к

этому последнему отношению, что выражается формально в появлении единичных значений χ -функции при соответствующих значениях аргументов ξ_i или посредством уменьшения числа признаков универсального отношения с χ_1 -функцией.

В соответствии с определением χ -функции, если некоторое свойство (или ему противоположное) отсутствует у конкретного отношения, то при этих значениях аргументов χ -функция обращается в нуль.

Прежде чем приступить к детальному сравнительному анализу отношений, введем ряд операций над характеристическими функциями. При сравнении отношений необходимо будет выяснить, чем они отличаются, например, от универсального отношения или друг от друга, каковы их общие и отличительные свойства.

После введения χ -функций отношений операциям на множестве свойств отношений можно поставить в соответствие алгебраические операции над χ -функциями.

Введем понятие об одноэлементных отношениях. Назовем отношение одноэлементным, если оно обладает одним единственным свойством из полного перечня свойств универсального отношения с χ -функцией. Тогда набор свойств любого отношения как подмножество из множества всех свойств может быть получен операцией объединения одноэлементных подмножеств:

$$S_l = \bigcup_{\xi_i \in S_l} \{\xi_i\}. \quad (5)$$

Операции объединения подмножеств свойств в терминах характеристических функций соответствует операция сложения последовательностей из нулей и единиц, производимая по правилам булевой арифметики:

$$S_m \cup S_n \rightarrow \chi_m + \chi_n.$$

Пересечению подмножеств свойств соответствует операция умножения соответствующих χ -функций:

$$S_m \cap S_n \rightarrow \chi_m \cdot \chi_n.$$

В результате операции пересечения образуется подмножество элементов, общих для двух исходных множеств. Таким образом, мы получаем простой способ выделения общих свойств в отношениях.

Другие операции над множеством свойств просто интерпретируются в терминах характеристических функций. Так, операции дополнения некоторого подмножества свойств S_n до всего множества S , формирующей отношение S_p , в которое входят все свойства из множества S , не содержащиеся в S_n , соответствует вычисление χ_n -функции из χ_1 -функции:

$$\bar{S}_n = S \setminus S_n \rightarrow \chi_1 - \chi_n.$$

Операции разности между произвольными подмножествами свойств уже не будет отвечать разность характеристических функций соответствующих отношений, так как в случае обычного вычитания произвольных последовательностей, состоящих из нулей и единиц, могут получаться отрицательные члены которые, по определению χ -функции, не входят в область допустимых значений. Однако если предварительно воспользоваться тождеством

$$S_k = S_n \setminus S_m = S_n \cap \bar{S}_m,$$

то соответствующая операция над χ -функциями примет вид

$$\chi_n [\chi_1 - \chi_m]$$

и ее результат даст χ -функцию подмножества S_k . Введение операции вычитания было необходимым, так как позволяло заключить для двух данных отношений, какие из описывающих их свойств принадлежат одному, но не принадлежат другому.

Если следует определить, по скольким признакам отличаются два данных отношения (сколько отличительных свойств отношению принадлежит и сколько не принадлежит из свойств другого отношения), то удобно ввести такую характеристику как расстояние между отношениями. Расстояниями между отношениями с наборами свойств S_n и S_m будем называть расстояние между соответствующими характеристическими функциями. Метрику на множестве χ -функций можно ввести аналогично метрике в пространстве сообщений [5, с. 90]. В нашем случае последовательность нулей и единиц, представляющая χ -функцию определенного отношения, можно рассматривать как сообщение, записанное в двоичном алфавите $U_r = \{0, 1\}$. В качестве расстояния между двумя последовательностями двоичных знаков можно рассматривать количество позиций, на которых у характеристических функций χ_n и χ_m стоят разные символы. Например, если два отношения имеют характеристические функции

$$\begin{aligned} \chi_n &= (x_1^n, x_2^n, x_3^n, \dots, x_R^n), \\ \chi_m &= (x_1^m, x_2^m, x_3^m, \dots, x_R^m), \end{aligned}$$

где x_i^n, x_i^m — «буквы» алфавита $U_r = \{0, 1\}$ и $x_i^n \neq x_i^m$ для $i = 1, 3, 8$, то две последовательности будут отличаться элементами в трех позициях и, по определению, расстояние между ними $d(\chi_n, \chi_m) = 3$.

Формула для вычисления расстояния имеет вид

$$d(\chi_n, \chi_m) = \sum_{r=1}^R (x_r^n \oplus x_r^m),$$

где \oplus — операция сложения по модулю 2;
 Σ — арифметическая сумма в обычном смысле.

Введенное таким образом расстояние удовлетворяет всем аксиомам метрики.

На основании произведенной формализации описания отношений можно заключить, что аксиоматический способ их задания позволяет осуществить необходимый анализ отношений при помощи простейших арифметических и логических операций, легко реализуемых на ЦВМ. Следствием такого анализа является выделение атрибутов соответствующих отношений, которые при подходящей интерпретации могут играть роль начальной организации систем.

В дальнейшем предполагается изучить ограничения, накладываемые на связи систем, обладающих высокой начальной организацией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бугай Ю. П. Свойства отображения и бионическое моделирование нервной системы. Сообщение 2. — В сб.: Проблемы бионики. Вып. 13. Харьков. «Вища школа», 1974, с. 86—93.
2. Петров Ю. А. Логические функции категорий диалектики. М., «Высшая школа», 1972. 271 с.
3. Шрейдер Ю. А. Равенство, сходство, порядок. М., «Наука», 1971. 254 с.
4. Вулих В. З. Краткий курс теории функции вещественной переменной. М. «Наука», 1965. 304 с.
5. Коршунов Ю. М. Математические основы кибернетики. М., «Энергия», 1972. 376 с.

УДК 03.00.21

Г. И. ОСЬМУХА

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ И САМООРГАНИЗАЦИЯ ПОЛИНЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Результаты экспериментов и имеющиеся в нейрофизиологической литературе сведения о свойствах нейрональной активности позволяют выделить на основании развиваемой концепции о вероятностно-статистической организации нейронов рабочих механизмов мозга понятие о его функциональной единице — нейронном ансамбле [1].

Изменчивость динамической мозаики нейронных ансамблей, по-видимому, может отражать осуществление сложнейших актов нервной деятельности. Однако накопленные данные дают больше оснований для постановки вопросов, чем для ответов. «Среди них ключевым является вопрос, по какому закону вероятностное участие неоднозначных нейронов в образовании динамических ансамблей обеспечивает закономерное реагирование нервного механизма при совмещении качеств высокой надежности с широкой полифункциональностью» [1, с. 11].

В настоящей работе сделана попытка осветить некоторые возможные принципы формирования нейронных ансамблей на основании введенного понятия функциональной устойчивости.

С нейрофизиологической точки зрения нейронный ансамбль представляет собой некоторую, в общем случае изменяющуюся группу нейронов в количестве от 10 до 10^6 , функциональные свойства которой заключаются в осуществлении ответной реакции на внешние раздражители.

Экспериментальные данные [1] позволяют выделить следующие характерные свойства организации ансамблей нейронной сети.

1. *Синергизм реакций нейронов ансамбля.* Данный тип взаимности реакций импульсной активности элементов ансамбля наглядно выступает в ответах нейронов, расположенных рядом друг с другом. Соседние нейроны можно идентифицировать весьма высокой степенью достоверности по признаку перекрытия полей распространения их потенциалов, т. е. по возможности одновременного отведения их импульсной активности одним микроэлектродом.

2. *Уравновешенность баланса возбуждающихся и затормаживающихся нейронов.* Она обнаруживается при одновременной регистрации импульсных ответов нервных клеток, находящихся не рядом, а на более или менее значительном удалении друг от друга. Если смежные нейроны реагируют, как правило, синергично, то между нейронами, расположенными на расстоянии друг от друга, появляются антагонистические отношения. Это означает, что при возбуждении группы нейронов, образующих рабочий ансамбль, одновременно возникают группы заторможенных нейронов, уравновешивающие этот микроочаг возбуждения. Поэтому экранная структура проекционного поля центрального отдела анализатора приобретает характер функциональной мозаики участков возбуждения и торможения [2].

3. *Региональность и коррелятивность нейронного ансамбля.* Если исходить из предположения, что ансамбль образуется нейронами однородного функционального состояния, то его размер определяется зоной возбужденных и заторможенных нейронов. Пусть ансамбль имеет возбужденное ядро, окруженное зоной торможения. Тогда для определения его размера к диаметру зоны синергизма возбужденных элементов следует добавить половину поперечника смежной зоны синергизма заторможенных клеток.

Сопоставление результатов сравнительно-физиологических экспериментов приводит к представлению о том, что эволюция нейронных ансамблей направлена к их дисперсии, дроблению на все более мелкие, но многочисленные ячейки. При этом делается предположение, что именно таким путем достигается эволюционное повышение разрешающей способности зрения и его остроты. Для более точной оценки пространственного распределения не-

ронов, входящих в ансамбль, имеет значение не только качественное определение типа реакций нейронов, но и количественная характеристика тесноты связи между их импульсными ответами. Такой характеристикой, как известно, является коэффициент корреляции, знак которого указывает на синергичное или антагонистическое направление связи между нейронами.

4. *Вероятностный характер неоднозначного участия нейронов в реакциях ансамбля.* Он связан не с какими-либо внешними причинами или непостоянством условий эксперимента, а отражает специфический способ функционирования.

Если в узловых нервной системе, где преобладают последовательные связи клеток, их сравнительно жесткий детерминизм обуславливал единообразие реакций и обеспечивал надежность функционирования средствами параллельного резервирования однозначных элементов, то в вероятностных ансамблях экраных структур неоднозначность нейронных элементов определяет свойственное высшим отделам мозга совмещение высокой надежности с полифункциональностью.

5. *Закономерная изменчивость параметров ансамблей при различных видах деятельности, выражающая их функциональное состояние.* Сложная картина мозаичного распределения групп возбужденных и заторможенных нейронов складывается в зависимости от источника и характера вызвавших ее афферентных сигналов и является физиологическим механизмом отражения разнообразных раздражителей внешней среды.

Описанные свойства нейронного ансамбля подробно рассмотрены в [1].

Прежде чем перейти к теоретическому описанию процесса формирования нейронного ансамбля, выскажем несколько замечаний о свойствах индивидуального нейрона.

Биоэлектрическую активность нейрона можно определить как стохастическую, обусловленную влиянием спонтанных полисинаптических потенциалов — МПСП, и детерминированную (генерация неслучайной последовательности нервных импульсов), зависящую от работы эндогенных механизмов клетки. Необходимо различать три основных состояния синапса нейрона: $\langle s_1 \rangle$ — надпороговое возбужденное, соответствующее развитию спайка; $\langle s_2 \rangle$ — подпороговое возбужденное, отвечающее формированию суммарного постсинаптического потенциала — СПСП, из возбуждающего местного постсинаптического потенциала — ВМПСП; $\langle s_3 \rangle$ — заторможенное, адекватное формированию СПСП из тормозящего местного постсинаптического потенциала — ТМПСП.

В предположении, что СПСП накапливается дискретными порциями, равными величине МПСП — Δs , состояние $\langle s_2 \rangle$ можно представить в виде множества состояний, ограниченного сверху величиной порога s_p , а снизу — состоянием соответствующего потенциалу покоя s_0 . Тогда, очевидно, размерность множества $\langle s_2 \rangle$, и равна $|s_p - s_0| : \Delta s$.

Аналогичные рассуждения можно провести и для состояния $\langle s_2 \rangle$, заменив при этом s_p состоянием $s_T = \min \langle s_3 \rangle$. Следовательно, $v = |s_0 - s_T| : \Delta s$.

Множество всех внутренних состояний моносинаптической нейрона $\langle s = s_1; s_{21}, \dots, s_{2u}, s_{31}, \dots, s_{3v} \rangle$ можно представить в виде энергетических уровней. Число таких уровней N составляет $1 + u + v$.

Состояние, соответствующее одному из данного числа уровней, будем называть микросостоянием. Для полисинаптической нейрона оно запишется как s_{ij} , $j \in \overline{1, q}$, где q — число синапсов $j \in \overline{1, N}$; для нейронной популяции имеем s_{ijk} , где индекс k указывает номер нейрона. Нетрудно видеть, что число микросостояний в нейронных популяциях, например, мозга млекопитающих очень велико.

Рассмотрим взаимодействие нейрона с внешней по отношению к нему средой. Указанную активность нейрона при случайном воздействии можно представить в виде структурной модели типа $D_1 \rightarrow D_2 \rightarrow A$, где D_1 — датчик случайных величин, отвечающий стохастическому влиянию среды; D_2 — датчик, соответствующий случайным процессам в клетке (спонтанным колебаниям мембранного потенциала); A — часть, адекватная детерминированной активности нейрона. Датчики D_1 и D_2 можно объединить в один D , на выходе которого наблюдается сложение потоков случайных сигналов. Тогда рассматриваемое взаимодействие будет иметь вид $D \rightarrow A$ и соответствует структурной модели вероятностного автомата [3].

Если под входным X и выходным Y алфавитами такого автомата понимать внешнее воздействие и реакцию нейрона (в частности, в качестве элементов x и y могут быть приняты значения межимпульсных интервалов), а под внутренними состояниями S — множество состояний s_{ijk} , то стохастическую модель «среда-нейрон» можно охарактеризовать множеством матриц переходных вероятностей $\langle M(x) \rangle$ и гомоморфизмом $S \rightarrow Y$.

Для рассматриваемой структурной модели элемент матрицы $m_{ij}(x) \in M(x)$ совпадает с вероятностью появления на входе нейрона, представленного в виде детерминированного автомата A находящегося в состоянии s_i , элемента входного алфавита $x \in X$ переводящего нейрон в состояние s_j (остальные индексы для краткости опущены).

Состояние полисинаптического нейрона в каждый момент времени t , согласно введенной модели, будет определяться множеством микросостояний $\langle s_{ij} \rangle$, которое в дальнейшем будем называть ω -поверхностью, или ω -функцией.

Тогда активность нейрона можно описать как функционирование вероятного автомата с числом внутренних состояний $S =$

$$= (1 + u + v) \sum_{i=1}^t \binom{j}{i} \quad (\text{обозначения прежние}). \quad \text{Такое представление}$$

остояний нейрона позволяет более гибко использовать математический аппарат, развитый в теории вероятностных автоматов, в частности свойства разложения стохастической матрицы $M(x)$

на линейной оболочке вида $M(x) = \sum_{i=1}^j b_i B_i$, где $\langle B_i \rangle$ — множество простых матриц, а $0 \leq b_i \leq 1$ и $\sum_{i=1}^j b_i = 1$. Разложение $M(x)$

бладает свойством континуальности, что очень важно, так как дает возможность свести нахождение некоторой структурной модели вероятностных автоматов к выбору значения функционала $\{M(x)\}$, наилучшим образом удовлетворяющего некоторому критерию, т. е. к задаче нахождения оптимума. Данный подход достаточно целесообразен, если учесть, что природа, «решая» задачу согласования нейрона с внешней средой, «пользуется» принципом наименьшего действия.

Покажем, как можно найти такой оптимум при определенных предположениях.

Введем несколько необходимых определений.

Определение 1. Состояния нейронов ω_i и ω_j называются эквивалентными, если $p_{\omega_i}(\bar{x}|\bar{y}) = p_{\omega_j}(\bar{x}|\bar{y})$ для всех пар \bar{x}, \bar{y} равной длины ($\dim \bar{x} = \dim \bar{y}$) над X и Y .

Определение 2. Два нейрона N и M называются эквивалентными по состояниям или стохастически эквивалентными, если для каждого $\omega_i \in S^N$ найдется такое $\omega_j \in S^M$, что $p_{\omega_i}(\bar{x}|\bar{y}) = p_{\omega_j}(\bar{x}|\bar{y})$ и для каждого $\omega_k \in S^M$ найдется такое $\omega_l \in S^N$, что $p_{\omega_k}(\bar{x}|\bar{y}) = p_{\omega_l}(\bar{x}|\bar{y})$ для всех пар $(\bar{x}|\bar{y})$, где S^N и S^M — множество внутренних состояний нейронов N и M соответственно.

Определение 3. Нейрон, эквивалентный по состояниям нейрону M , но имеющий наименьшее число ω -состояний, называется приведенной формой (ПФ) нейрона M .

Если $M^* = [X, Y, S^*, \langle M^*(x) \rangle]$ — приведенная форма нейрона $M = [X, Y, S, \langle M(x) \rangle]$, то матрица $M^*(x)$ называется приведенной формой матрицы $M(x)$.

Определение 4. Состояние ω_i нейрона N называется устойчивым по состоянию входа x_i , если выполняются условия: 1) нейрон N под воздействием элемента входного алфавита x_i переходит в состояние ω_i ; 2) нейрон N под воздействием x_i не переходит из состояния ω_i в состояние $\omega_j \neq \omega_i$.

Такое свойство в дальнейшем будем называть функциональной устойчивостью.

Постулируем: функциональная устойчивость нейрона достигается тогда и только тогда, когда состояние нейрона ω соответствует его приведенной форме ω^* .

Можно предположить, что введенное утверждение отвечает принципу наименьшего действия в пространстве внутренних состояний, так как по сути, определяет экстремальные свойства

процесса согласования состояний нейрона с внешним раздражением.

Перед описанием оптимизации ω -состояний нейрона с внешней средой выскажем замечание о его приведенной форме.

Приведенная форма нейрона M^* , во-первых, означает, что для устойчивой реализации некоторого внешнего воздействия требуется минимальное количество микросостояний, т. е. в частном случае при постоянных j, k значение i минимально, и, следовательно, нейрон обладает минимальным суммарным мембранным потенциалом. Во-вторых, это означает, что активированы не все, а только часть синапсов, и, таким образом, имеется минимум по второму индексу j . Наконец, если рассматривать полную линейронную систему в целом, то в этом случае приведенная форма соответствует также некоторому минимальному k .

Обобщая, следует заключить, что приведенная форма нейрона популяции в целом характеризуется минимумом по всем трем индексам i, j и k .

Рассмотрим аналитическую процедуру получения ПФ для нейронной популяции, основанную на методах оптимизации внутренних состояний теории вероятностных автоматов.

Первый способ минимизации внутренних состояний нейронной структуры сводится к отысканию максимальных групп совместных внутренних состояний на основе объединения эквивалентных состояний [4]. Происходит как бы их «склеивание». Примером может служить число синапсов, участвующих в устойчивой реализации внешнего раздражения. Это число является функцией мощности и длины входного алфавита, увеличиваясь или уменьшаясь в зависимости от последнего. При этом, если внутреннее состояние нейрона (состояние синапса) s_j склеивается с внутренним состоянием s_i , то в матрице $M(x)$ вычеркивается строка i и столбец j , а столбец i заменяется на сумму столбцов i и j , т. е. происходит уменьшение ранга матрицы до n^* . Заметим, что склеивание строк i и j в разложении $M(x)$ означает объединение внутренних состояний s_i и s_j в детерминированной, соответствующей этому разложению части нейрона A рассматриваемой структурной модели.

Оставшиеся не использованными внутренние состояния можно определить как их резервное число.

Без доказательства будет приведена следующая

Теорема. Если нейрон N^* получен из нейрона N объединением максимальных групп совместных внутренних состояний, то нейрон N^* эквивалентен по внутренним состояниям нейрону N и следовательно, стохастически ему эквивалентен.

Из этой теоремы и введенного постулата можно заключить, что операция склеивания позволяет получить приведенную форму нейрона N . Оператор склеивания в дальнейшем будем обозначать через \hat{C} .

Из общих соображений ясно, что оператор \hat{C} описывает случай, когда длина входного алфавита, устойчиво реализованного нейроном или группой нейронов, меньше некоторой предельной длины l_0 входного алфавита X_0 , еще обладающего свойством устойчивой реализации.

Не нарушая общности рассуждения, можно предположить, что для очень широкого класса внешних воздействий на некоторую группу нейронов условие функциональной устойчивости нарушается. Тогда следующим этапом решения задачи о согласовании нейронной сети со средой является рассмотрение нарушения условия функциональной устойчивости.

При решении данной задачи полезно использовать накопленный опыт. Действительно, оператор \hat{C} соответствует случаю, когда множество внутренних состояний нейрона S обладает определенным избытком относительно некоторого входного алфавита X . Тогда при нарушении функциональной устойчивости можно предположить, что наблюдается недостаток числа внутренних состояний и что относительно таких состояний необходимо ввести некоторую структурную избыточность, т. е. дополнительное число внутренних состояний.

Опишем это аналитически. Известно, что разложение вида $M(x) = \sum b_i B_i$ позволяет провести анализ функциональной устойчивости внутренней структуры стохастически функционирующей системы и выявить неустойчивые внутренние состояния. Тогда задача о согласовании сводится к тому, чтобы неустойчивое внутреннее состояние s_i «расщепить» по крайней мере на два внутренних состояния s'_i и s''_i . Очевидно, что избыточность, определяемая числом дополнительных внутренних состояний, равна числу неустойчивых внутренних состояний и минимальна. Таким образом, в случае неустойчивой реализации некоторого входного алфавита группа нейронов, участвующих в реакции, преобразуется в группу с большим числом внутренних состояний. При этом стохастическая матрица $M(x)$ преобразуется в стохастическую матрицу $M^*(x)$.

Правило перехода от $M(x)$ к $M^*(x)$ при расщеплении внутреннего состояния s_j формулируется следующим образом:

- 1) к матрице $M(x)$ добавляется $(n + 1)$ -й нулевой столбец;
- 2) в качестве $(n + 1)$ -й строки образованной матрицы выбирается j -я строка, а в качестве j -й строки — стохастический вектор с единицей в j -м разряде;
- 3) в $(n + 1)$ -й строке переставляются элементы, состоящие на j -м и $(n + 1)$ -м местах.

Данный метод легко обобщается на случай p неустойчивых состояний.

Оператор расщепления внутренних состояний обозначим через \hat{P} . Ясно, что он является обратным к оператору \hat{C} . Необходимо

заметить, что приведенная форма нейронной сети будет получена после выполнения некоторого шага по описанным алгоритмам.

Раскроем физиологический смысл введенных операторов. Полисинаптическая структура нейрона позволяет даже одиночному нейрону охарактеризовать некоторой совокупностью микросостояний, определенным образом распределенных по синапсам нейрона и приводящих к устойчивой реализации (в смысле определения 4) внешнего раздражения. Поэтому уже на уровне одного нейрона должны наблюдаться основные свойства структурно-функциональной организации нейронной сети, если последнюю рассматривать как дальнейшее увеличение числа синапсов. Одним из таких основных свойств является приспособительная деятельность нервной клетки к внешнему раздражителю. Обусловленная внутренними клеточными процессами, эта деятельность заключается в выработке устойчивых реакций на входное раздражение при минимальных энергетических затратах. В данной работе предполагается, что введенные принципы склеивания и расщепления внутренних состояний отражают реальную картину образования группы нейронов, обладающей свойством функциональной устойчивости.

Определение 5. Процессом согласования нейронной сети с внешней средой назовем процесс формирования устойчивых реакций под действием операторов \hat{C} и \hat{P} .

Рассматриваемое согласование задано на основании двух принципов: наименьшего действия и устойчивости внутренних состояний, что позволяет высказать предположение об универсальности операций склеивания и расщепления внутренних состояний.

Описанное согласование довольно просто интерпретируется нейрофизиологически.

Действительно, предположим, что на синапсы нейрона поступает некоторый афферентный сигнал, который в зависимости от состояния сети, согласно введенным операциям \hat{C} и \hat{P} , уменьшает или увеличивает число активированных синапсов, формирующую реакцию сети. При этом активизация синапсов может происходить двояким образом: во-первых, под влиянием собственных синапсов нейрона, во-вторых, за счет синапсов, образованных на соседних нейронах популяции.

В первом случае наблюдается образование обратной связи, приводящей к процессу активного согласования, во втором — образование группы нейронов, некоторой полинейрональной системы, обладающей свойством функциональной устойчивости.

Определение 6. Нейронным ансамблем M будем называть совокупность взаимосвязанных нейронов, реализующих устойчивую реакцию в смысле определения 4, где под сигналом внешней среды понимается некоторый входной алфавит X , длины $l(X)$ и мощности $dl(x)/dt$.

Введенное определение позволяет рассматривать нейронный ансамбль как функциональную единицу нейрональной сети. Тако-

ансамбль в зависимости от внешних сигналов будет формироваться, изменяться, в том числе распадаться. Однако в процессе длительного функционирования под постоянным внешним воздействием ансамбль может закрепиться морфологически. При этом корреляционные связи между нейронами, входящими в состав ансамбля, могут усилиться и даже стать неслучайными.

Определение 7. *Исходная стохастическая матрица $M(x)$ адает согласование сложности Z , если для формирования устойчивой реакции сети относительно входного алфавита X требуется $n = Z$ преобразований исходной матрицы $M(x)$:*

$$M^0(x) \rightarrow M^1(x) \rightarrow \dots \rightarrow M^Z(x),$$

где индекс показывает увеличение ранга исходной матрицы.

Оператор \hat{C} описывает обратное течение процесса. Наглядной иллюстрацией процесса согласования нейронной популяции с сигналами внешней среды на основе формирования ансамблей

операторами \hat{C} и \hat{P} могут служить данные работы [2]. Ее авторы предложили возможный физиологический механизм образования группировок возбужденных нейронов путем ограниченных торможением множественных цепных реакций. Предполагаемый ход возбуждения нейронной сети по данным [2] (рис. 1) можно сравнить с модификацией графа оператора \hat{P} (рис. 2).

Реакции нейронов сенсо-моторной области коры на электрооужное раздражение соответствует определенная гистограмма (рис. 3). Такая же гистограмма отвечает процессу формирования

нейронного ансамбля на основе операторов \hat{C} и \hat{P} . Совпадение будет еще более наглядным, если учесть, что петли, образованные в нейронном ансамбле, в течение определенного времени могут распадаться и приводить к возбуждениям типа цепных реакций.

На рис. 3 ось ординат обозначает количество спайков, ось абсцисс — время. Согласно описанному, первый максимум обусловлен «расщеплением» начальных внутренних неустойчивых состояний, остальные пики гистограммы — временным сдвигом приходящего афферентного сигнала и распадом петель обратной связи.

Опишем динамику формирования нейронного ансамбля при воздействии на полинейронную структуру сигналов в виде протейшего потока, генерируемого датчиком D .

Предположим, что нейронная сеть в каждый момент времени может находиться в одном из описанных выше состояний M^0, M^1, \dots , множество которых конечно или счетно. Тогда за промежутков времени длительностью h система из состояния M^n в момент t с вероятностью $\lambda_n h + 0(h)$ переходит в состояние M^{n+1} и с вероятностью $\nu_n h + 0(h)$ — в состояние M^{n-1} . Вероятность

остаться за этот же промежуток времени в состоянии M^n равно $1 - \lambda_n \hbar - \nu_n \hbar + O(\hbar)$.

Предположим далее, что постоянные λ_n и ν_n зависят от n , но не зависят от t и от того, каким образом система перешла в это состояние.

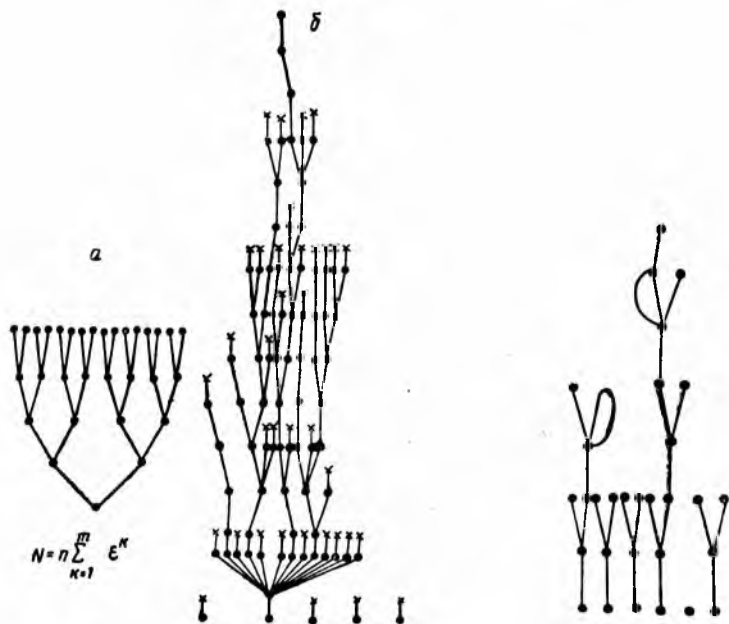


Рис. 1. Возможный физиологический механизм образования нейронного ансамбля путем множественных цепных реакций (по данным М. Н. Ливанов). а — типичная схема цепной реакции; б — схема вероятного течения процесса возбуждения в сенсо-моторной области коры головного мозга кролика в ответ на короткое электрокожное раздражение.

Рис. 2. Модификация графа оператора «расщепления» с петлями обратной связи.

Переход $M^n \rightarrow M^{n+1}$ означает, что произошло расщепление неустойчивого состояния, а $M^n \rightarrow M^{n-1}$ — склеивание избыточно состояния. Вероятность данного перехода обозначим через p_{ij} . Если известно только распределение вероятностей $\pi_i(x)$ начального состояния M^i , то распределение вероятностей находится в состоянии M^j , $j = i \pm 1$, n в момент времени t равна полной вероятности, вычисляемой по формуле

$$p_j(t) = \sum \pi_i p_{ij}(t).$$

Для заданной структурной модели формулу (1) перепишем в виде

$$m_j(t) = \sum \pi_i m_{ij}(t),$$

где

$$m_{ij}(t) = m_{ij}[x(t)] \in M(x).$$

Тогда, согласно [5], процессам перехода соответствуют дифференциальные уравнения

$$m_{i0}(t) = \lambda_0 m_{i0}(t) + \nu_i m_{i1}, \quad (3)$$

$$m_{ij}(t) = -(\lambda_j + \nu_j) m_{ij}(t) + \lambda_{j-1} m_{i,j-1}.$$

Они представляют собой частный случай уравнений Колмогорова, которые описывают непрерывные случайные процессы марковского типа. Условия существования и единственности решений этой системы уравнений хорошо выяснены.

Необходимое равенство

$$\sum_{n=1}^{\infty} m_n(t) = 1 \quad (4)$$

может быть выполнено не всегда. Согласно теореме Феллера,

разность $1 - \sum_{n=1}^{\infty} m_n(t)$ следует интерпретировать как вероятность бесконечного числа изменений состояний за время t . Такая возможность означает взрыв, или, по введенной терминологии, расщепление неустойчивых внутренних состояний. Для того чтобы это было так, достаточно расходимости ряда

$$\sum_{k=1}^{\infty} \prod_{i=1}^k \frac{\nu_i}{\lambda_i}. \quad (5)$$

Последнее условие достаточно ясно. Оно означает, что поступление на вход нейронной сети входного алфавита происходит быстрее, чем его устойчивая реализация на внутренних состояниях.

Равенство (4) является также условием функциональной устойчивости. Нарушение его приводит к перераспределению внутренних состояний таким образом, чтобы оно выполнилось.

Сформулированные в данной работе в терминах теории вероятностных автоматов свойства нейронного ансамбля на основе представления о вероятностно-статистической организации нейрональной сети хорошо совпадают с пятью основными свойствами нейронного ансамбля, полученными экспериментально. Это позволит в дальнейшем исследовать формирование целесообразных реакций клеточной популяции в условиях стохастической стимуляции и рассмотреть проблему самоорганизации системы нервных клеток в целом.

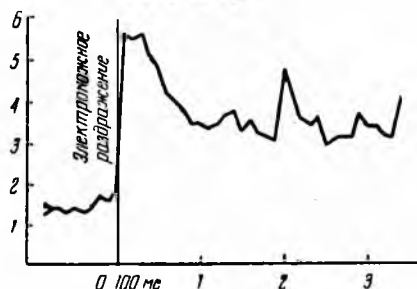


Рис. 3. Реакция нейронов сенсорной области коры на электрокожное раздражение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коган А. Б. Об организации нервных клеток в нейронные ансамбли.— В кн.: Современные проблемы нейрокибернетики. Л., «Наука», 1972, с. 9—18.
2. Ливанов М. Н. Торможение в нейронных системах коры головного мозга.— В кн.: Рефлексы головного мозга. М., 1965, с. 35—54.
3. Паршенков В. Г., Ченцов В. М. Вопросы теории вероятностных автоматов.— В кн.: Автоматы и управление сетями связи. М., 1971, с. 73—89.
4. Лаварев В. Г., Ченцов В. М. О минимизации числа внутренних состояний стохастического автомата.— В кн.: Синтез дискретных автоматов и управляющих устройств. М., 1968, с. 85—93.
5. Гнеденко Б. В., Коваленко И. Н. Введение в теорию массового обслуживания. М., «Наука», 1966. 332 с.

УДК 519.15

А. А. ДАБАГЯН, В. Н. КСЕНЗЕНКО

МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ЦВМ БЭСМ-6 ПРОЦЕССА РАЗВИТИЯ И САМОВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ОРГАНИЗМА

В работе предпринята попытка смоделировать на ЦВМ процесс развития и самовоспроизведения организма. Несмотря на прежние неоднократные попытки, большинство моделей примитивны и отражают только весьма частные свойства живых организмов. Даже в самой полной модели М. Аптера [1] процесс развития ограничен только явлением репликации ДНК.

В предлагаемой модели, кроме репликации ДНК, ставится задача отобразить процессы транскрипции и трансляции, регуляции (позитивной и негативной) на уровне транскрипции.

В качестве «прототипа» нашего гипотетического организма был принят бактериофаг λ . Это обуславливалось следующими причинами. С одной стороны, бактериофаги являются самыми простыми организмами с точки зрения химического строения (простые бактериофаги состоят лишь из ДНК и белка), структурной организации (центрально расположенная ДНК окружена белковой оболочкой, зачастую состоящей из идентичных субъединиц), лишены своей белоксинтезирующей системы (для этой цели используют белоксинтезирующую систему клетки-хозяина). В то же время бактериофаги обладают сложной системой временного контроля синтеза РНК на матрице ДНК и транскрипции белка на матрице РНК (трансляция). Интересно, что принципы регуляции, транскрипции и трансляции являются универсальными не только для фагов, но, по крайней мере, и для прокариот.

Бактериофаг λ относится к лизогенным фагам. Его хромосома способна интегрироваться с хромосомой клетки-хозяина (в данном случае *E. Coli*) и реплицироваться с ней в процессе редупликации ДНК как единое целое. Однако хромосома фага «встроена» в хромосому *E. Coli* лишь при наличии репрессора бактериофага λ , блокирующего синтез вирусных РНК (негативная регуляция

на уровне транскрипции). В случае инактивации репрессора фаг переходит к литическому циклу развития: нарушает все биосинтетические процессы в клетке-хозяине, использует ее ферменты, белоксинтезирующий аппарат для синтеза «своих» РНК, белка; реплицирует «свою» ДНК, формирует новые частицы, лизирует клетку, а затем инфицирует еще не зараженные клетки *E. Coli* и т. д. Следовательно, хромосома бактериофага может быть как в зарепрессированном, неактивном состоянии, так и в состоянии активного функционирования. Подобные переходы от неактивного к активному состоянию у высших, по-видимому, являются основой дифференцирования на молекулярном уровне.

Таким образом, используя некоторые принципы, лежащие в основе развития бактериофага λ , мы имеем возможность смоделировать некий гипотетический организм, способный к дифференцированию (в нашем упрощенном случае — переходить от неактивного состояния в активное), самовоспроизведению, обладающему системой регуляции, свойственной не только прокариотам, но, вероятно, и эукариотам. Сам бактериофаг λ является чрезвычайно сложным объектом. Поэтому в модели использованы лишь некоторые принципы функционирования и регуляции его генома. Естественно, не могло быть и речи о сохранении последовательности генов и тем более последовательности оснований в ДНК (кстати, еще не известной ни для одного гена или сколько-нибудь длинного участка ДНК фага) структуры ферментов и пр.

В модели использовано еще одно важное допущение. По современным представлениям, биологический код считается триплетным, вырожденным и непересекающимся. В связи с тем, что теория биологического поля уже довольно хорошо описана [2—4], разбирать подробно эту проблему не имеет смысла. Не претендуя на опровержение существующих воззрений, мы сделали предположение о невырожденности генетического кода. Считаем, что существует несколько разных языков, для которых из двадцати слов (у нас — аминокислот) существует лишь одно трехбуквенное сочетание из четырех имеющихся букв (в нашем случае — нуклеотидов).

Таким образом, вместо «синонимов», обозначающих одно и то же понятие в единственно возможном языке, получается набор слов, взятых из различных языков, т. е. каждый из языков не является избыточным, а «вырожденность» кода объясняется тем, что за синонимы принимаются слова, взятые из разных языков.

Нам кажется, что, используя данное предположение, можно получить модель дифференцирования и ракового перерождения клеток при переходе от одного «значащего» языка к другому. При переходе же к языку «бесмысленному» клетка погибает.

Биологический алгоритм

Транскрипция 1 или построение м-РНК1, комплементарно части одной из ветвей ДНК фага-родителя.

Трансляция 1 — построение фермента 1 по матрице м-РНК1. После окончания этого процесса и только после него (т. е. когда данный фермент синтезируется в нужном количестве) начинается следующий этап.

Транскрипция 2, т. е. считывание следующего гена (гена 2), далее по м-РНК2 синтезируется фермент 2 (трансляция 2) и т. д. Только после того, как в нужном количестве будут синтезированы все белки, начинается заключительный процесс — репликации ДНК. После окончания и этого «готовый» дочерний организм начинает существовать самостоятельно. Однако обычно для одной клетки-хозяина до ее окончательной гибели этот процесс успевает пройти несколько раз. Поэтому в результате получается около 100 новых фагов. Поскольку число репродуцированных особей несущественно, работа модели заканчивается после построения пяти новых организмов. Кроме того, на уровне м-РНК контролируется правильность выбора языка считывания. Если имеется несколько языков, то выбор нужного из них, вероятно, контролируется некоторыми ферментами.

Затем еще до начала транскрипции 1 производится контроль на наличие репрессора, т. е. если репрессор присутствует в системе, то транскрипция 1 и все последующие операции не производятся, что соответствует лизогенному состоянию фага. В противном случае процесс протекает по приведенному выше алгоритму (литическое развитие фага).

Математическая модель

Принятые операции осуществляются строго последовательно согласно блок-схеме.

Для синтеза ферментов предусмотрена стандартная процедура. **PROCEDURE** фермент (длина, начало, кол, Ч, Ф, ХР). Здесь формальные параметры означают следующее:

длина — количество ячеек в хромосоме, которые отвечают за построение данного фермента;

начало — номер ячейки в хромосоме, с которой начинается считывание м-РНК;

кол — количество молекул данного фермента, которые нужно построить;

Ф — массив ферментативной памяти;

Ч — номер первого свободного элемента в массиве Ф;

ХР — массив рабочих ячеек, куда переписывается ДНК для работы **PROCEDURE** фермент (рис. 2).

Программа

В качестве хромосомы выбран массив из 18 ячеек: ДНК [0:17]. Это только одна ветвь ДНК (рабочая). Другая, комплементарная ей ветвь в памяти машины не записана, поскольку она не нужна для работы модели (считывание производится только с одной ветви). В каждой из ячеек записано по шесть шестизначных триплетов. Для нуклеотидов приняты следующие коды: А — 00; Г — 01; У — 10; Ц — 11.

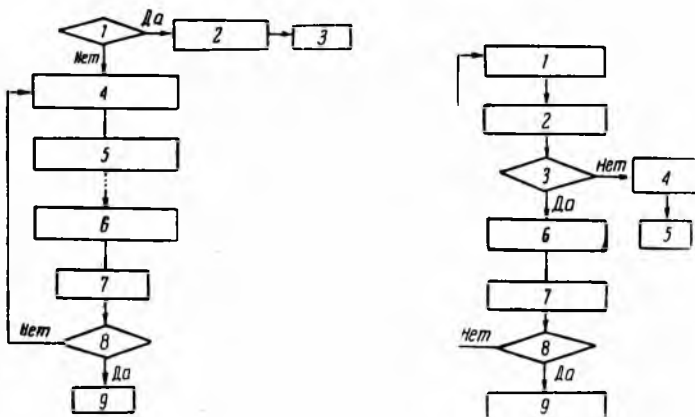


Рис. 1. Блок-схема операций:

1 — есть ли репрессор?; 2 — печать «репрессор»; 3 — останов; 4 — синтез фермента 1 (длина, начало, кол, Ч, Ф, ХР); 5 — синтез фермента 2 (длина, начало, кол, Ч, Ф, ХР); 6 — синтез фермента n (длина, начало, кол, Ч, Ф, ХР); 7 — воспроизведение ДНК; 8 — проработал ли цикл пять раз?; 9 — конец.

Рис. 2. Блок-схема PROCEDURE фермент:

1 — выбор участка считывания; 2 — построение м-РНК в массиве РНК; 3 — проверка соответствия языка; 4 — печать «несоответствие языка»; 5 — останов; 6 — синтез фермента; 7 — запись фермента в память; 8 — проработал ли цикл «кол» раз?; 9 — конец.

Таким образом, в одной ячейке записано по шесть триплетов, и, значит, полезная информация занимает 36 разрядов в каждой ячейке.

Программа записана в основном в системе АЛГОЛ — АВТОКОД машины БЭСМ-6.

АЛГОЛ-программа

```
BEGIN PROCEDURE фермент (длина, начало, кол, Ч, Ф, ХР);
  INTEGER длина, начало, кол, Ч; ARRAY Ф, ХР;
BEGIN ARRAY РНК [0:10], А [0:200], АК [0:76]; REAL а1,
  а2, С, I, I, К, L, Н, Н1, Ч, длит, дл, Я1, Я,
  Я2, Я3, Я4, Я7, СЧТ, Д, n; DOWN С ТЕСТ:
  777777777777, Г1:20, Г5:21, Г10:22, Г15:23,
```

Г20 : 40, Г25 : 41, Г30 : 42, Г35 : 43, Г40 : 60,
 Г45 : 61, Г50 : 62, Г55 : 63, Г60 : 45, Г65 : 46,
 Г70 : 47, Г75 : 65, Г80 : 66, Г85 : 67, Г90 : 72,
 Г95 : 73, **UP COMMENT** это искусственный
 прием, позволяющий записать в ячейки Г1 —
 Г100 нужные двоичные коды; АК[0] :- Г1;
 АК[4] :- Г5; АК[8] :- Г10; АК[12] :- Г15;
 АК[16] :- Г20; ...; АК[76] :- Г95;

МО : 1 :- начало; Я : -1 :- 0; Я1 :- длина; Н1 :- начало,
 длит :- 6х длина; Я2 :- Я3 :- 0; **FOR** 1 :- начало
STER 1 UNTIL Н1 DO BEGIN а1 :- ХР :- ДНК
 [1]; **DOWN** К; СЧа1, СР ТЕСТ, ЗЧа2, **UP**;
COMMENT это операция сравнения и построе-
 ния м-РНК; РНК [1] :- а2; I :- I + 1; 1 :- 1 + 1;
END; К : Ч + 1; М1 : СЧТ :- 0; С :- РНК [1];
 Н :- 0; **DOWN** С; Я4 : 26 **UP**; М2 : **DOWN** К;
 СЧЯ4, УИ10, СЧС, 10СД, 3410, СД (52), ЗЧС,
UP; **COMMENT** это выделение нужного трип-
 лета при помощи сдвигов; М3 : Я7 :- АК [Н];
IF С-Я7 **THEN GO TO** М4; Н :- Н + 4; **IF**
 Н > 60 **THEN GO TO** П1 **ELSE** М3; **FOR** дл :- 1
STER 1 UNTIL 5 DO BEGIN Ф [К] :- АК [Н];
 К :- К + 1; Н :- Н + 1; **END**; СЧТ :- СЧТ + 1;
 СЧТ - 6 ≤ 0 **THEN BEGIN** Я4 :- Я4 - 6; **GO**
TO М2; **END**; I : I + 1; длина :- длина - 1; **IF**
 длина > 0 **THEN GO TO** П2;

М5 : Ч-СВ :- Ч + Я1 × 24; **IF** кол > 0 **THEN GO TO**
 М0; П1 : **ВЫВОД** ('Т' 'несоответствие' языка); П2 :
 п-0; **FOR** Д :- Ч **STEP 1 UNTIL** Ч + Я1 **DO**
BEGIN А [п] :- Ф [Ч]; Ч :- Ч + 1; п :- п + 1; **END**;
ВЫВОД ('Z - 2Д.', 'm2B', 'кол 5B', 'Z -
 - 6Д.', 'A3/'); **COMMENT** это печать сформир-
 ованного фермента; **GO TO** М5;

М6 : **END**;
INTEGER длина, начало, кол, Ч, кл, U, АЛ,
 Л1, Л2, СВ, репрессор;
REAL X0, X1, X2, ..., X17, СВ; **ARRAY** ДНК
 [0 : 17], ФЕР [0 : 1 000], ДНК1 [0 : 200]; **GO TO**
 М11;

М10 : Ч :- 0; U :- 1; Л1 :- 0; репрессор :- 0; **FOR**
 АЛ :- 1 **STEP 1 UNTIL 5 DO**
BEGIN **ВЫВОД** ('Т', 'ФАГ', 'Z - Д', U); **CO-**
MMENT это печать номера потомка исходного
 фага; U :- U + 1; **IF** репрессор < 0 **THEN GO**
TO М8; **BEGIN** **ВЫВОД** ('Т' 'репрессор'); **END**;
COMMENT это проверка на наличие репрессо-
 ра и сообщение о нем; **GO TO STOP**;
END; **ВЫВОД** ('Т' 'фермент 1');

PROCEDURE фермент (1, 0, 2, 4, ДНК);
ВЫВОД ('Т' 'фермент 2'); **PROCEDURE** фермент (4, 3, 3, 4, ДНК); **ВЫВОД** ('Т' 'фермент 3'); **PROCEDURE** фермент (8, 1, 5, 4, ДНК); **ВЫВОД** ('Т' 'фермент 4'); **PROCEDURE** фермент (9, 2, 3, 4, ДНК); **ВЫВОД** ('Т' 'фермент 5'); **PROCEDURE** фермент (15, 2, 4, ДНК);

M11: DOWN C; XO: 321517345757, X1: 315455561430,
X2: 323031171417, X3: 573230311615, X4: 121
110100504, X5: 321111130505, X6: 3737353534005
X7: 555455555454, X8: 040405051616, X9: 35
3535040404, X10: 171717170404, X11: 323235541
212, X12: 111005040404, X13: 575657565656,
X14: 545657040404, X15: 343435343535, X16: 32
3130323232, X17: 363634040404, UP;

COMMENT это занесение хромосомы в память;
ДНК [0]: -XO;

ДНК [1]: -X1; ДНК [2]: -X2; ДНК [3]: -X3;
...; ДНК [17]: X17; GO TO M10;

BEGIN FOR Л2: -0 STEP 1 UNTIL 17 DO
BEGIN ДНК1 [Л1]: -ДНК [Л1] Л1: -Л1 + 1;

END; END;

STOP; END.

Таким образом, составлена программа, которая в основном отражает наиболее существенные особенности процесса самовоспроизведения и развития организма. Программа составлена преимущественно в АЛГОЛе, что делает ее достаточно универсальной. Вставки нескольких автокодовых операторов существенно не влияют на реализацию алгоритма, так как могут быть выполнены на любой машине, которая предусматривает АЛГОЛ-программы с автокодом или с машинным языком.

При работе модели были получены следующие результаты. Использовалась хромосома длиной в 18 ячеек, т. е. имеющая 108 триплетов. Мы считали, что в ДНК содержится всего пять активных генов — I, II, III, IV, V с параметрами:

ген I длина — одна ячейка (шесть триплетов),

начало — нуль, т. е. это элемент ДНК [0], количество молекул фермента I — две;

ген II — соответственно 4, 3, 3;

ген III — » 8, 1, 5;

ген IV — » 9, 2, 3;

ген V — » 15, 2, 4.

Для каждой из аминокислот было зарезервировано по четыре ячейки: первая содержит кодон, остальные три — свободны и в них можно занести сокращенное название этой аминокислоты. Для аминокислот был построен один из 408 возможных непересекающихся кодов [5], а именно: УГГ, ЦАУ, ЦАА, УАЦ,

ДНК [0: 17]

VI	V	IV	III	II	I
011010	001101	001111	011100	101111	101111
УГГ	ЦАУ	ЦАА	УАЦ	ГАА	ГАА
011001	101101	101101	101110	001100	011000
УГУ	ГАЦ	ГАУ	ГАГ	ЦАЦ	УГЦ
011010	011000	011001	001111	001100	001111
УГГ	УГЦ	УГУ	ЦАА	ЦАЦ	ЦАА
101111	011010	011000	011001	001110	001101
ГАА	УГГ	УГЦ	УГУ	ЦАГ	ЦАУ
001010	001001	001000	001000	000101	000100
ЦГГ	ЦГУ	ЦГЦ	ЦГЦ	ЦУУ	ЦУЦ
011011	001001	001001	001011	000101	000101
УГГ	ЦГУ	ЦГУ	ЦГГ	ЦУУ	ЦУУ
011111	011111	011101	011101	011100	000101
УАА	УАА	УАУ	УАУ	УАЦ	ЦАА
101101	101100	101101	101101	101100	101100
ГАУ	ГАЦ	ГАУ	ГАУ	ГАИ	ГАЦ
000100	000100	000101	000101	001110	001110
ЦУЦ	ЦУЦ	ЦУУ	ЦУУ	УАГ	УАГ
011101	011101	011101	000100	000100	000100
УАУ	УАУ	УАУ	ЦУЦ	ЦУЦ	ЦУЦ
001111	101111	101111	101111	000100	000100
ЦАА	ГАА	ГАА	ГАА	ЦУЦ	ЦУЦ
011010	011010	011101	101100	001010	001010
УГГ	УГГ	УАУ	ГАЦ	ЦГГ	ЦГГ
001001	001000	000101	000100	000100	000100
ЦГУ	ЦГЦ	ЦУУ	ЦУЦ	ЦУЦ	ЦУЦ
101111	101110	101111	101110	101110	101110
ГАА	ГАГ	ГАА	ГАГ	ГАГ	ГАГ
101100	101110	101111	000100	000100	000100
ГАЦ	ГАГ	ГАА	ЦУЦ	ЦУЦ	ЦУЦ
011100	011100	011101	011100	011101	011101
УАЦ	УАЦ	УАУ	УАЦ	УАУ	УАУ
011010	011001	011000	011010	011010	011010
УГГ	УГУ	УГЦ	УГГ	УГГ	УГГ
011110	011110	011100	000100	000100	000100
УАГ	УАГ	УАЦ	ЦУЦ	ЦУЦ	ЦУЦ

Рис. 3. Общий вид хромосомы.

ГАА, УГУ, ГАЦ, ГАУ, ГАГ, ЦАЦ, УГЦ, ЦАГ, ЦГГ, ЦГУ, ЦГЦ, ЦУУ, ЦУЦ, УАА, УАУ, УАГ.

Хромосома имела вид, изображенный на рис. 3.

В результате работы модели получены пять организмов, состоящих из ДНК (совпадающих с исходной), и ферментов, состоящих из определяемой генами последовательности аминокислот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алтер М. Кибернетика и развитие. М., «Мир», 1970. 257 с.
2. Математические проблемы в биологии. [Сборник статей]. Под. ред. Р. Беллмана. М., «Мир», 1966. 233 с.
3. Ичас М. Биологический код. М., «Мир», 1971. 186 с.
4. Лучник Н. В. Биофизика цитогенетических поражений и генетический код. Л., «Медицина», 1968. 176 с.
5. Шатун Ю. Я., Дабегян А. В. К вопросу о генетическом коде. — В кн.: Материалы науч.-техн. конф. по итогам научных работ за 1969 г. Вып. 7. Харьков, Изд-во Харьк. ун-та, 1970, с. 32—35.

УДК 62.506.2

В. Ф. АНАНИН

НЕПРОИЗВОЛЬНЫЕ САККАДИЧЕСКИЕ ДВИЖЕНИЯ ГЛАЗ — БИОЛОГИЧЕСКИЙ МОДУЛЯТОР ИНФОРМАЦИИ В ЗРИТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ

Для выделения полезной информации в тех технических системах, которые связаны с различного рода датчиками, воспринимающими входную информацию, принимаются меры с целью повысить соотношение сигнал — шум (С—Ш). Так, в фотоэлектронных системах данное соотношение можно увеличить, помимо других способов, методом амплитудной модуляции, позволяющим работать в высоком частотном диапазоне при ограниченной полосе частот. Этот метод дает возможность резко снизить шумы фотоприемника и тем самым повысить соотношение С — Ш. Кроме того, дискретная информация, снимаемая с фотоприемника при его модуляции, может быть усилена значительно легче без всяких промежуточных ее преобразований. Тем самым она без труда дифференцируется на фоне шумов. Все это в конечном итоге создает условия для повышения достоверности принимаемой информации. Логично допустить, что нечто подобное должно иметь место и в сетчатке глаза, которая играет роль своеобразного датчика, преобразовывающего световую энергию в рецепторный потенциал.

Для сетчатки как датчика также характерны шумы, на фоне которых глаз воспринимает полезную информацию. Гельмгольц назвал их собственным светом сетчатки. Характер шумового возбуждения проявляется в виде спонтанной импульсации, причем

импульсы следуют друг за другом через неравные промежутки времени. Р. Гранит [1] считает возможным отождествлять эту спонтанную темновую пульсацию с собственным светом сетчатки, т. е. с ее шумами. При воздействии же на сетчатку светового возбуждения в зрительных волокнах имеет место дискретная информация. Естественно, возникает вопрос: на каком уровне зрительного тракта достигается модуляция воспринимаемой информации. Так, А. И. Бызов считает, что от рецепторов до ганглиозных клеток сигналы могут передвигаться безимпульсно [2]. При этом он ссылается на отсутствие импульсов в рецепторах горизонтальных клеток и биполярах при внутреннем отведении потенциалов, а также на опыт с тетродоксином (Мураками, 1963), устраняющим импульсную передачу сигналов, но не препятствующим прохождению сигнала до ганглиозных клеток. Кроме того, если исходить из квантовой структуры света, можно допустить, что роль своеобразного модулятора выполняют отдельные фотоны света, попадающие на рецептор. В этом смысле опыты С. И. Вавилова [3] с пороговыми световыми значениями на уровне нескольких квантов в какой-то степени подтверждают сказанное, а сама модуляция рецепторного сигнала должна начинаться с рецептора, т. е. с его наружного членика. В этом отношении, по-видимому, прав Уолд, отводя свету в первичном зрительном акте роль пускового стимула или, точнее, выполняющего триггерную функцию, т. е. модулятора. Однако подобное предположение никак не согласуется с известным явлением стабилизированного изображения на сетчатке глаза. При сохранении полной неподвижности изображения на сетчатке глаз перестает его видеть через 1—3 секунды. Это означает, что по зрительным волокнам, отходящим с этого участка сетчатки, в мозг перестает поступать дискретная информация, а вместе с ней прекращается и модуляция информации. Нетрудно заметить, что роль световых квантов как модуляторов в этом случае не может быть признана.

Прекращение активности в зрительных волокнах, связанных с участком сетчатки, на котором находится стабилизированное изображение, невозможно, по нашему мнению, объяснить и явлениями адаптации. Подобное предположение основывается на полученных экспериментально результатах слишком медленного изменения концентрации родопсина, находящегося в наружных члениках рецепторов. Так, Раштон и Кэмбелл (см. [4]) обнаружили, что при световой адаптации изменению чувствительности в десятки тысяч раз соответствует изменение родопсина менее чем на 10%. По данным Уолда (см. [5, с. 172]), фотохимические процессы, возникающие в сетчатке при действии даже очень сильного света, протекают с крайне незначительным расходом родопсина. Через пять секунд после начала воздействия света большой интенсивности в каждой палочке расщепляется около 0,005% родопсина. По проведенным в 1954 г. расчетам Раштона и Козна (см. [6, с. 49]), при адаптации глаза в течение

трех минут к свету яркостью 30 фут-ламбертов разрушается только 0,3% пигмента. Авторы делают вывод, что значительное падение при этом светочувствительности вызывается изменением в нервных элементах сетчатки. Раштон обнаружил, что количество родопсина уменьшается всего на несколько тысячных при действии света, вызывающего изменение порога в 50 раз.

Вместе с тем в случае стабилизированного изображения из зрительного процесса, как известно, исключаются только непроизвольные саккадические движения глаз. Остальные факторы сохраняются при этом аналогично тем, которые имеют место при нормальном зрительном процессе. Естественно предположить, что роль модулятора, создающего дискретную импульсацию в зрительных волокнах, выполняют именно эти непроизвольные саккадические движения глаз. Мы полагаем, что эта функция для них в зрительном процессе является основной.

Согласно литературным данным, саккадические движения глаз и их возникновение связывается с рефлекторной природой, соответственно которой появление скачка обусловлено выходом изображения точки за границы рецептивного поля. Появление скачка рассматривается как обратная связь, выполняющая коррекционную роль с целью возвратить изображение точки в пределы рецептивного поля.

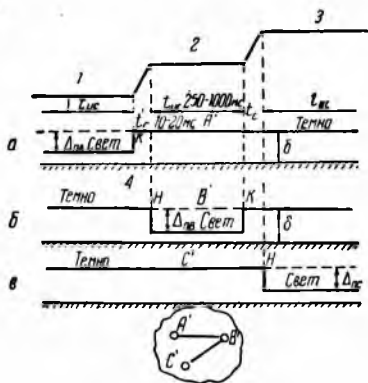
Однако подобная роль саккадических движений глаз не подтвердилась [7, 8]. Полученные результаты позволяют говорить о специальном центре, генерирующем данные скачки, что, в свою очередь, еще больше убеждает в их назначении как модулятора.

Деадаптационная роль саккадических движений глаз в зрительном процессе также не подтвердилась нашими экспериментами, проводимыми при разных яркостях фонового освещения. Результаты экспериментов показали, что с увеличением яркости фона число непроизвольных саккадических движений глаз уменьшается, в то время как они должны учащаться, если определять их значение с точки зрения дезадаптационной роли и при этом запускаящим стимулом считать расходование светочувствительного вещества на данном участке сетчатки. Если же рассматривать их значение в роли модулятора света, а частоту нервных импульсов в зрительных волокнах как функцию $f_{зр} = f(P_{св} V_c)$, где $P_{св}$ — давление света на пигментный слой сетчатки, а V_c — скорость непроизвольных саккадических движений глаз, то уменьшение числа последних при больших яркостях фона в данном случае вполне закономерно.

Таким образом, при оценке роли непроизвольных саккадических движений глаз в зрительном процессе мы исходили из того, что в норме саккадические движения обусловлены постоянно идущими в определенном ритме афферентными посылками, основная цель которых — создавать условия для получения дискретной информации путем толчкообразной переброски изображения с

одного участка пигментного слоя сетчатки на другой и ударно воздействия на последний. Именно момент попадания изображения на другой участок сетчатки вследствие саккадического движения глаза и является начальным звеном в образовании дискретной информации. Схематически это можно представить следующим образом.

Предположим, что изображение фиксационной точки проецируется на участок сетчатки A' (рисунок). В этом случае свет согласно ранее высказанной нами гипотезе [9], оказывает давление на пигментный слой (рисунок, а) в течение времени $t_{ис}$ деформирует его на величину Δ относительно его исходной величины толщиной пигментного слоя δ , соответствующей темноте.



Схема, поясняющая роль саккадических движений глаз в возникновении рецепторного потенциала. Давление света на трех участках пигментного слоя: 1 — A' ; 2 — B' ; 3 — C' ; 4 — сосудистый слой сетчатки.

В момент скачка продолжительностью t_c изображение фиксационной точки попадает на участок сетчатки B' , деформируя его на величину $\Delta_{пв}$, в то время как в момент схождения изображения с участка A' последний вследствие упругости пигментного слоя возвращается к исходному уровню δ . Начало появления дискретной информации в зрительных волокнах, отходящих от участка B' , должно совпадать с моментом окончания скачка, т. е. с моментом попадания изображения точки на участок B' . На рисунке б это соответствует точке E .

Аналогичная картина будет наблюдаться и при последующем проецировании изображения точки на участок C' и далее (рисунок, в).

Таким образом, каждый новый скачок сопровождается залпом дискретных импульсов в зрительных волокнах, связанных с тем участком сетчатки, на который попадает изображение. Сами же рецепторы мы рассматриваем как биологический вариант пьезодатчиков, для которых сжатие и растяжение вдоль их продольной оси в результате упругой деформации участка пигментного слоя под действием давления света, попавшего на него, являются исходными моментами при образовании дискретной информации в зрительных волокнах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гранит Р. Электрофизиологическое исследование рецепции. М., Изд-во иностр. лит., 1957. 160 с.
2. Бызов Л. А. Электррфизиологические исследования сетчатки. М., «Наука», 1966. 124 с.
3. Вачилов С. И. Микроструктура света. М., Изд-во АН СССР, 1950. 144 с.
4. Смирнов М. С. Гипотеза о механизме фоторецепции в сетчатке. — «Биофизика», 1959, т. 4, вып. 2, с. 43—50.
5. Беликова Э. П., Павлова Р. С. Учебное пособие по медицинской биофизике. М., «Медицина», 1962. 86 с.
6. Демирчоглян Г. Г. Физиология и патология сетчатки глаза. М., «Медицина», 1964. 178 с.
7. Филин В. А., Ананин В. Ф., Мизинова Т. П. Изучение микродвижений глаз слепых. — В сб.: Новости медицинского приборостроения. Вып. 2. М., 1969, с. 52—55.
8. Филин В. А., Ананин В. Ф. О временных противоречиях гипотезы коррекционной роли саккадических движений глаз. — «Биофизика», 1972. № 4, с. 721 — 723.
9. Ананин В. Ф., Филин В. А. Роль пигментного слоя в трансформации световой энергии в сетчатке глаза позвоночных. — В кн.: Рефераты докл. IV Всесоюз. конф. по нейрокибернетике. Ростов н/Д., Изд-во Рост. ун-та, 1970, с. 8 — 9.

УДК 62.506.2

С. Ф. КАЦАЛАП

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОТОБРАЖЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ВИДОВ МЕХАНИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ

Существенное место в проблеме создания отображающих устройств занимает разработка устройств отображения, способных отличать различные виды механического движения объектов и вычислять их основные параметры. Если учесть, что нейронные структуры зрительного анализатора обладают некоторыми из этих способностей (1, 2), то при решении поставленной задачи можно воспользоваться результатами исследования их функциональных и структурных свойств. Математические модели функциональных свойств нейронных структур зрительного анализатора, предпочтительно реагирующих на движение стимула (объекта), а также на движение стимула в определенном направлении, описаны в работе [3]. Эти модели соответствуют нелинейным дифференциальным операторам, определяющим скорость движения стимула и ее проекции на координатные оси. В настоящем сообщении по данным [3] получены нелинейные дифференциальные операторы, выделяющие некоторые другие особенности поступательного движения стимула, а также оператор, выделяющий вращательное движение стимула.

Однако нелинейные дифференциальные операторы являются детекторами соответствующих свойств лишь для точек, лежащих в области существования входных сигналов, на границах же

областей они могут принимать другие значения. Поэтому для отделения граничных значений выходных сигналов необходимы соответствующие преобразования, которые целесообразно определять при решении конкретной технической задачи.

В зрительной системе мухи [2] обнаружены нейронные структуры интегративного типа. Некоторые из них обладают максимальной реакцией при движении стимула по окружности вокруг определяемого центра. Функциональные свойства таких структур можно формально описать следующим образом.

Если размеры стимула во много раз меньше радиуса окружности, то такое движение можно считать поступательным. Поэтому, рассматривая положение стимула в прямоугольной системе координат для некоторого момента времени, проведем через стимул окружность, центр которой лежит в начале координат (рис. 1). По проекциям скорости на координатные оси можно определить две другие проекции скорости на ортогональные прямые, направленные по касательной к окружности и нормали (радиусу) проектируя две проекции на направление последних:

$$v_k = -\frac{\partial S_1}{\partial t} \sin \alpha + \frac{\partial S_2}{\partial t} \cos \alpha; \quad (1)$$

$$v_n = -\frac{\partial S_1}{\partial t} \cos \alpha + \frac{\partial S_2}{\partial t} \sin \alpha, \quad (2)$$

где $\frac{\partial S_1}{\partial t}$ и $\frac{\partial S_2}{\partial t}$ определены в работе [3]:

$$\frac{\partial S_1}{\partial t} = \frac{\frac{\partial I}{\partial t} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 I}{\partial t} \frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial I}{\partial y}}{\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \frac{\partial I}{\partial y}}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial S_2}{\partial t} = \frac{\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial x} - \frac{\partial I}{\partial t} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2}}{\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} - \frac{\partial I}{\partial y} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2}}; \quad (4)$$

$$\cos \alpha = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}; \quad \sin \alpha = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}. \quad (5)$$

Подставляя (3), (4), (5) в (1), (2), получаем

$$v_k = \frac{\left(\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial x} - \frac{\partial I}{\partial t} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2}\right) x - y \left(\frac{\partial I}{\partial t} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial x} \frac{\partial I}{\partial y}\right)}{\left(\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} - \frac{\partial I}{\partial y} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2}\right) \sqrt{x^2 + y^2}}; \quad (6)$$

$$v_n = \frac{\left(\frac{\partial I}{\partial t} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial x} \frac{\partial I}{\partial y}\right) x + y \left(\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial x} - \frac{\partial I}{\partial t} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2}\right)}{\left(\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \frac{\partial I}{\partial y}\right) \sqrt{x^2 + y^2}}. \quad (7)$$

Оператор (6), определяющий касательную составляющую скорости, принимает максимальное по модулю значение при движе

нии стимула по окружности, центр которой лежит в начале координат, и минимальное — при прямолинейном движении стимула в радиальном направлении. В случае движения стимула по направлению вращения часовой стрелки (6) принимает положительное значение, а при движении в обратном направлении — отрицательное.

Противоположными свойствами обладает оператор (7), определяющий нормальную составляющую скорости. Он принимает максимальное значение по модулю при движении его по окружности. Если движущийся стимул удаляется от центра, то (7) принимает положительное значение. Если же движение вызывает приближение стимула к центру, то (7) принимает отрицательное значение.

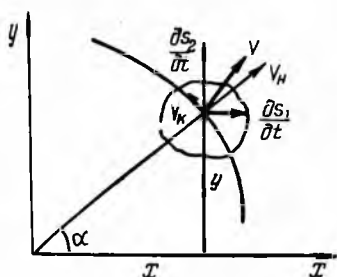


Рис. 1.

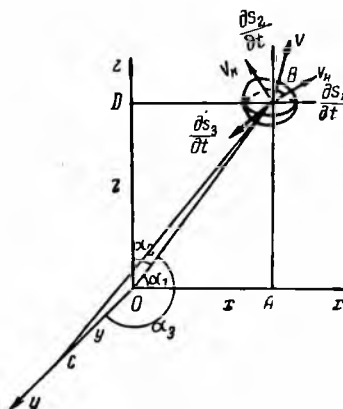


Рис. 2.

Если нет необходимости измерять v_k и v_n , а требуется лишь выделить движение стимула по окружности либо его радиальное движение, то для этих целей достаточно воспользоваться операторами числителей выражений (6) и (7):

$$R_k = x \left(\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial x} - \frac{\partial I}{\partial t} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \right) - y \left(\frac{\partial I}{\partial t} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial x} \frac{\partial I}{\partial y} \right) = \\ = \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial x} \left(x \frac{\partial I}{\partial x} + y \frac{\partial I}{\partial y} \right) - \frac{\partial I}{\partial t} \left(x \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + y \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \right); \quad (8)$$

$$R_n = x \left(\frac{\partial I}{\partial t} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial x} \frac{\partial I}{\partial y} \right) + y \left(\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial x} - \frac{\partial I}{\partial t} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \right) = \\ = \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial x} \left(y \frac{\partial I}{\partial x} - x \frac{\partial I}{\partial y} \right) + \frac{\partial I}{\partial t} \left(x \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} - y \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \right). \quad (9)$$

Найдем аналогичные операторы для движения небольшого объекта в пространстве (рис. 2). На рис. 2 изображено некоторое положение движущегося объекта в трехмерной декартовой системе координат. Через точку объекта B мысленно проведена сфера, центр которой совпадает с началом координат; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ — углы,

образованные радиусом сферы и координатными осями; $\frac{\partial S}{\partial t}$, $\frac{\partial S_2}{\partial t}$, $\frac{\partial S_3}{\partial t}$ — проекции скорости на координатные оси; v_n — проекция v на направление пересечения касательной к сфере в точке B плоскостью, образованной v_n и v .

Проектируя $\frac{\partial S_1}{\partial t}$, $\frac{\partial S_2}{\partial t}$ и $\frac{\partial S_3}{\partial t}$ на радиальное направление в точке B , находим нормальную составляющую скорости, учитывая которую можно определить касательную составляющую скорости:

$$v_n = \frac{\partial S_1}{\partial t} \cos \alpha_1 + \frac{\partial S_2}{\partial t} \cos \alpha_2 + \frac{\partial S_3}{\partial t} \cos \alpha_3; \quad (10)$$

$$v_n = \left| \sqrt{v^2 - \left(\frac{\partial S_1}{\partial t} \cos \alpha_1 + \frac{\partial S_2}{\partial t} \cos \alpha_2 + \frac{\partial S_3}{\partial t} \cos \alpha_3 \right)^2} \right|, \quad (11)$$

$$v^2 = \left(\frac{\partial S_1}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial S_2}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial S_3}{\partial t} \right)^2. \quad (12)$$

Решая систему уравнений, приведенную в работе [3], можно получить значения

$$\frac{\partial S_1}{\partial t} = \frac{\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial t} \left(\frac{\partial^2 I}{\partial y \partial z} \frac{\partial I}{\partial y} - \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \frac{\partial I}{\partial z} \right) + \frac{\partial^2 I}{\partial y \partial t} \left(\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \frac{\partial I}{\partial z} - \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial z} \frac{\partial I}{\partial y} \right) + \frac{\partial I}{\partial t} \left(\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial z} \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 I}{\partial y \partial z} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \right)}{\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial t} \left(\frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \frac{\partial I}{\partial x} - \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \frac{\partial I}{\partial y} \right) + \frac{\partial^2 I}{\partial y \partial t} \left(\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \frac{\partial I}{\partial y} - \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \frac{\partial I}{\partial x} \right) + \frac{\partial I}{\partial z} \left[\left(\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \right]}; \quad (13)$$

$$\frac{\partial S_2}{\partial t} = \frac{\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial t} \left(\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \frac{\partial I}{\partial z} - \frac{\partial^2 I}{\partial y \partial z} \frac{\partial I}{\partial x} \right) + \frac{\partial^2 I}{\partial y \partial t} \left(\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial z} - \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \frac{\partial I}{\partial z} \right) + \frac{\partial I}{\partial t} \left(\frac{\partial^2 I}{\partial y \partial z} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial z} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \right)}{\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial z} \left(\frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \frac{\partial I}{\partial x} - \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \frac{\partial I}{\partial y} \right) + \frac{\partial^2 I}{\partial y \partial z} \left(\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \frac{\partial I}{\partial y} - \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \frac{\partial I}{\partial x} \right) + \frac{\partial I}{\partial z} \left[\left(\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \right]}; \quad (14)$$

$$\frac{\partial S_3}{\partial t} = \frac{\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial t} \left(\frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \frac{\partial I}{\partial x} - \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \frac{\partial I}{\partial y} \right) + \frac{\partial^2 I}{\partial y \partial t} \left(\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \frac{\partial I}{\partial y} - \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \frac{\partial I}{\partial x} \right) + \frac{\partial I}{\partial t} \left[\left(\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \right]}{\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial z} \left(\frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \frac{\partial I}{\partial x} - \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \frac{\partial I}{\partial y} \right) + \frac{\partial^2 I}{\partial y \partial z} \left(\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \frac{\partial I}{\partial y} - \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \frac{\partial I}{\partial x} \right) + \frac{\partial I}{\partial z} \left[\left(\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \right]}; \quad (15)$$

$$\cos \alpha_1 = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}, \quad \cos \alpha_2 = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}},$$

$$\cos \alpha_3 = \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}. \quad (16)$$

При радиальном движении объекта (10) принимает максимальное по модулю значение, а при движении по поверхности сферы — минимальное. Если объект удаляется от центра сферы, то (10) принимает положительное значение. В противном случае, т. е. при приближении объекта к центру сферы, (10) принимает отрицательное значение. Противоположными свойствами обладает оператор (11), максимальное положительное значение которого вызывает движение объекта по поверхности сферы, а минимальное соответствует радиальному движению объекта.

Детектирование отклонений от прямолинейных и равномерных движений

Учитывая (3), (4), можно получить детектор, реагирующий на отклонения от прямолинейного движения стимула:

$$R = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\left(\frac{\partial S_1}{\partial t}\right)^2}{\left(\frac{\partial S_1}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial S_2}{\partial t}\right)^2}. \quad (17)$$

При прямолинейном движении отношение между проекциями скоростей на координатные оси является постоянным, поэтому (17) принимает нулевое значение.

С учетом (13)—(15) получим операторы, реагирующие на отклонения от движения в плоскостях, перпендикулярных к плоскости *хоу*, а также в плоскостях, перпендикулярных к плоскости *хоз*:

$$R = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\left(\frac{\partial S_1}{\partial t}\right)^2}{\left(\frac{\partial S_1}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial S_2}{\partial t}\right)^2}; \quad (18)$$

$$R = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\left(\frac{\partial S_1}{\partial t}\right)^2}{\left(\frac{\partial S_1}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial S_3}{\partial t}\right)^2}. \quad (19)$$

Принимая во внимание (19), (18), можно получить оператор, реагирующий на отклонение от прямолинейного движения объекта в пространстве:

$$R = \left| \frac{\partial}{\partial t} \frac{\left(\frac{\partial S_1}{\partial t}\right)^2}{\left(\frac{\partial S_1}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial S_2}{\partial t}\right)^2} \right| + \left| \frac{\partial}{\partial t} \frac{\left(\frac{\partial S_1}{\partial t}\right)^2}{\left(\frac{\partial S_1}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial S_3}{\partial t}\right)^2} \right|. \quad (20)$$

В одномерной модели оператор, реагирующий на изменение жорости движения объекта, соответствует ускорению движения.

Поэтому, учитывая оператор, определяющий скорость движения [3], можно вычислить ускорение:

$$R = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial S}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial I}{\partial t} \right). \quad (21)$$

Операторы, определяющие проекции скорости на координатные оси в двумерной — (3), (4) — и трехмерной — (13), (14), (15)-моделях позволяют получить соответствующие операторы, реагирующие на отклонение от равномерного движения:

$$R = \frac{\partial}{\partial t} \left[\left(\frac{\partial S_1}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial S_2}{\partial t} \right)^2 \right], \quad (22)$$

$$R = \frac{\partial}{\partial t} \left[\left(\frac{\partial S_1}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial S_2}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial S_3}{\partial t} \right)^2 \right]. \quad (23)$$

Детектирование вращательного движения

Стимулу, совершающему произвольное движение в плоскости можно поставить в соответствие входной сигнал $I [x \cos \varphi(t) - y \sin \varphi(t) + S_1(t), x \sin \varphi(t) + y \cos \varphi(t) + S_2(t)]$, заданный в некоторой области

$\Phi [x \cos \varphi(t) - y \sin \varphi(t) + S_1(t), x \sin \varphi(t) + y \cos \varphi(t) + S_2(t)]$, где $\varphi(t)$ определяет вращательное движение стимула, а $S_1(t)$, $S_2(t)$ — его поступательное движение.

Продифференцируем входной сигнал по времени:

$$\begin{aligned} \frac{\partial I}{\partial t} = & \frac{\partial I}{\partial x_1} \left(-x \sin \varphi \frac{\partial \varphi}{\partial t} - y \cos \varphi \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial S_1}{\partial t} \right) + \\ & + \frac{\partial I}{\partial y_1} \left(x \cos \varphi \frac{\partial \varphi}{\partial t} - y \sin \varphi \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial S_2}{\partial t} \right), \end{aligned} \quad (24)$$

где

$$x_1 = x \cos \varphi - y \sin \varphi + S_1;$$

$$y_1 = x \sin \varphi + y \cos \varphi + S_2.$$

Дифференцируя входной сигнал по переменным x и y , получаем

$$\frac{\partial I}{\partial x} = \frac{\partial I}{\partial x_1} \cos \varphi + \frac{\partial I}{\partial y_1} \sin \varphi; \quad (25)$$

$$\frac{\partial I}{\partial y} = -\frac{\partial I}{\partial x_1} \sin \varphi + \frac{\partial I}{\partial y_1} \cos \varphi. \quad (26)$$

Из системы уравнений (25), (26) находим

$$\frac{\partial I}{\partial x_1} = \frac{\partial I}{\partial x} \cos \varphi - \frac{\partial I}{\partial y} \sin \varphi; \quad (27)$$

$$\frac{\partial I}{\partial y_1} = \frac{\partial I}{\partial x} \sin \varphi + \frac{\partial I}{\partial y} \cos \varphi. \quad (28)$$

Подставляя (27), (28) в (25) и выполняя соответствующие преобразования, получаем

$$\begin{aligned} \frac{\partial I}{\partial t} = \frac{\partial \varphi}{\partial t} \left(-y \frac{\partial I}{\partial x} + x \frac{\partial I}{\partial y} \right) + \frac{\partial S_1}{\partial t} \left(\frac{\partial I}{\partial x} \cos \varphi - \frac{\partial I}{\partial y} \sin \varphi \right) + \\ + \frac{\partial S_2}{\partial t} \left(\frac{\partial I}{\partial x} \sin \varphi + \frac{\partial I}{\partial y} \cos \varphi \right). \end{aligned} \quad (29)$$

Дифференцируя (29) по переменным x и y , имеем

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial x} = - \left(y \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial I}{\partial y} + x \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \right) \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \left(\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \cos \varphi - \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \sin \varphi \right) \frac{\partial S_1}{\partial t} + \\ + \left(\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \sin \varphi + \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \cos \varphi \right) \frac{\partial S_2}{\partial t}; \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial y} = \left(-\frac{\partial I}{\partial x} - y \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} + x \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \right) \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \left(\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \cos \varphi - \right. \\ \left. - \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \sin \varphi \right) \frac{\partial S_1}{\partial t} + \left(\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \sin \varphi + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \cos \varphi \right) \frac{\partial S_2}{\partial t}. \end{aligned} \quad (31)$$

Решая совместно систему уравнений (29), (30) и (31), определяем угловую скорость вращения стимула:

$$\begin{aligned} \frac{\partial I}{\partial t} \left[\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] + \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial y} \left(\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} - \frac{\partial I}{\partial y} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \right) + \\ + \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial x} \left(\frac{\partial I}{\partial y} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} - \frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\quad}{-\frac{\partial I}{\partial x} \left(\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} - \frac{\partial I}{\partial y} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \right) + \frac{\partial I}{\partial y} \left(\frac{\partial I}{\partial y} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} - \frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \right)}. \end{aligned} \quad (32)$$

Оператор (32) не зависит от параметров $S_1(t)$ и $S_2(t)$. Следовательно, он не реагирует на поступательное движение стимула. Оператор (32), как и (4), при вращении стимула за часовой стрелкой принимает положительное значение, а при вращении его в противоположном направлении — отрицательное. Однако если (4) позволяет выделять вращательное движение только небольших объектов, вращающихся вокруг определенного центра, удаленного на большое расстояние от самого объекта, то (32) позволяет определять вращение независимо от положения его центра и размеров объекта.

Если нет необходимости измерять угловую скорость вращательного движения стимула, а требуется лишь детектировать его вращение, то для этой цели достаточно воспользоваться оператором числителя (32):

$$\begin{aligned} R = \frac{\partial I}{\partial t} \left[\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] + \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial y} \left(\frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} - \frac{\partial I}{\partial y} \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} \right) + \\ + \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial x} \left(\frac{\partial I}{\partial y} \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} - \frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \right). \end{aligned} \quad (33)$$

Оператор (33) также является числителем выражения (15) для $\frac{\partial S^3}{\partial t}$, поэтому он тождествен детектору, реагирующему при поступательном движении в пространстве на движение стимула, направленное по оси oz (3). Следовательно, один и тот же оператор в зависимости от рассматриваемых входных сигналов может детектировать различные их свойства.

Таким образом, полученные в данной работе результаты позволяют формировать некоторые функции нейронных структур зрительного анализатора, указывают на пути использования существующих операторов для дальнейшего анализа пространственно-временных сигналов, дают возможность подойти к разработке соответствующих технических анализаторов сигналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Костелянец Н. Б., Левушина Е. И. Восприятие движения. — В кн.: Физиология сенсорных систем. Ч. 1-я. Физиология зрения. М., «Наука», 1971, с. 304—318.
2. Mimura K. Movement Discrimination by the Visual System of Flies. — «Zeitschrift für Vergleichende Physiologie», 1971, Bd 73 H2, S. 105—138.
3. Кацалал С. Ф. Математическое исследование функциональных свойств нейронных структур, чувствительных к движению. — В сб.: Проблемы бионики. Вып. 13. Харьков, «Вища школа», 1974, с. 30—36.

УДК 62.506.2

С. А. УСЕНКО

К ВОПРОСУ О ВОСПРИЯТИИ ШУМОВ СЛУХОВЫМ АНАЛИЗАТОРОМ ЧЕЛОВЕКА

Цель настоящей работы — изучить определенные психофизические явления, связанные с восприятием шума слуховым анализатором человека, и построить их математическую модель. В частности, исследовался вопрос: однозначно ли частотный спектр полосового шума определяет его ощущение слуховым анализатором человека либо возможна такая ситуация, при которой два шума, имеющие различные частотные спектры, воспринимаются человеком как одинаковые.

Опыт проводился с помощью установки, описанной в работе [1].

Перед испытуемым была поставлена задача добиться полного субъективного равенства двух шумовых сигналов путем изменения в одном из них огибающей частотного спектра. Эксперименты осуществлялись в звукоизолированной камере отдельно с каждым испытуемым. Все они прослушивали сигналы моноурально и имели доступ к пульту управления. Временные соотношения в посылке шума выбирались следующим образом. Период нарастания и спада уровня шума был постоянным и равнялся 1 с,

а длительность временного интервала с постоянным уровнем (плато) — 3 с. Интервал между стандартными и сигнальным шумом составлял 1 с. Испытуемый имел возможность менять очередность подачи стимулов.

В опытах участвовали десять испытуемых с нормальным слухом. Была применена следующая методика экспериментов. Испытуемый должен был изменять физический параметр сигналов до наступления полного субъективного равенства ощущений данных сигналов. При этом сознание человека использовалось в качестве нуля-органа. Экспериментатор получал только ответы «да» или «нет», т. е. равны или не равны два сигнала. Перед произнесением определенного ответа испытуемый прослушивал необходимое, с его точки зрения, число посылок стимула.

Опыты проводились на четырех уровнях звукового давления 60, 70, 80 и 90 дБ. В первой серии экспериментов посредством четырех фильтров вырезались узкие полосы шумов в различных участках спектра. При помощи одного анализатора устанавливался постоянный сигнал с фиксированной огибающей частотного спектра. Этот сигнал считался эталонным, его физические параметры были неизменными. Спектральные характеристики другого сигнала изменялись в процессе эксперимента до тех пор, пока испытуемый не добивался полного совпадения звучаний. Опыт проводился при выключенном анализаторе спектра. Испытуемому была дана установка выравнивать шумы, каждый раз меняя последовательность ручек потенциометров анализатора. Сигналы включались экспериментатором, и испытуемый должен был давать ответы «да» при совпадении сигналов по звучанию и «нет» — в случае их несовпадения. Когда испытуемый говорил «да», т. е. ему удавалось добиться субъективного равенства двух сигналов, включался анализатор спектра. С его помощью производилось визуальное сравнение двух спектров шумов. Результат опыта во всех случаях был один и тот же: ощущение субъективного равенства двух сигналов возникало только в том случае, если их частотные спектры совпадали.

Данный эксперимент был повторен с подключением всех десяти фильтров анализаторов, характеристики которых перекрывают диапазон частот от 150 до 10 000 Гц. Уровни звукового давления оставались прежними. На этот раз перед испытуемыми стояла довольно сложная задача: при помощи десяти ручек произвести выравнивание двух сигналов. После некоторой тренировки испытуемые добивались этого.

Результаты опыта оставались неизменными, сигналы слышались одинаковыми только при совпадении их спектров. Приведенные данные позволяют сделать вывод, что слуховой анализатор человека реагирует на всю огибающую частотного спектра. Эта кривая однозначно определяет наше ощущение шума.

Математически интерпретируем описанный опыт, используя [2]. При восприятии сигнала слуховой анализатор человека реа-

лизует некоторую функцию F . Для нахождения вида этой функции рассмотрим уже известную систему преобразования сигналов — «черный ящик», на вход которого подается упорядоченная пара входных сигналов $\langle x_1, x_2 \rangle$. В нашем случае — это различные полосы шума. Пары входных сигналов выбираются из некоторого множества H . Обозначим множество всех пар входных сигналов, допустимых в эксперименте, через W , которое является некоторым подмножеством декартова произведения $H \times H$. На предъявление некоторой пары испытуемый реагирует двоичным ответом: «да» или «нет». Следовательно, испытуемый реализует некоторую функцию F , определенную на множестве W и принимающую значения 0 и 1.

В общей ситуации функция F обладает следующими свойствами:

- 1) $F(x, x) = 1$ (рефлексивность);
- 2) если $\langle x_1, x_2 \rangle \in W$ и $F(x_1, x_2) = 1$, то $\langle x_2, x_1 \rangle \in W$ и $F(x_2, x_1) = 1$ (симметричность);
- 3) если $\langle x_1, x_2 \rangle \in W$, $\langle x_2, x_3 \rangle \in W$, $F(x_1, x_2) = 1$, $F(x_2, x_3) = 1$, то $\langle x_1, x_3 \rangle \in W$, $F(x_1, x_3) = 1$ (транзитивность).

Как показывает эксперимент, в интересующей нас ситуации функция F такова, что $F(x_1, x_2) = 1$, если и только если $x_1 = x_2$. Следовательно, условия 1)–3) выполняются.

Пусть H_0 — подмножество H , состоящее из тех x , для которых существует хотя бы один y такой, что $F(x, y) = 1$. В этом случае функция F определяет на множестве H_0 некоторое отношение эквивалентности. Множество W при этом является декартовым произведением $H_0 \times H_0$.

Как показано в [2], если функция F определена на декартовом произведении $W = H_0 \times H_0$, принимает значения 0 и 1 и удовлетворяет условиям 1)–3), то существуют некоторое множество G и функция $\varphi: H_0 \rightarrow G$ такая, что

$$F(x_1, x_2) = L(\varphi(x_1), \varphi(x_2)), \quad (1)$$

где L — характеристическая функция диагонали квадрата:

$$L(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \neq y, \\ 1 & \text{при } x = y. \end{cases} \quad (2)$$

Таким образом, выражения (1), (2) являются адекватным математическим описанием восприятия полосовых шумов слуховым анализатором человека.

Наше множество G разбивается на классы одноэлементных множеств $\{x\}$ и представляет собой множество субъективных ощущений. Под ощущением мы понимаем некоторый класс эквивалентности в множестве физических стимулов. В исследуемой ситуации каждый класс эквивалентности состоит из одного элемента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Усенко С. А., Черкашенко Н. И. Формирователь полосовых шумов. — В сб.: Проблемы бионики. Вып. 12. Харьков, «Вища школа», 1974, с. 20—21.
2. Майстровская Л. М., Ольховский Ю. Г., Шабанов-Кушнаренко Ю. П. О некоторых бинарных отношениях. — В сб.: Проблемы бионики. Вып. 9. Харьков, Изд-во Харьк. ун-та, 1972, с. 37—40.

УДК 612.014.519 95

С. Л. ЗАГУСКИН, канд. биол. наук, В. С. ЭМ, Л. Д. ЗАГУСКИНА

ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИКИ В НЕРВНОЙ КЛЕТКЕ: ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ РЕОРГАНИЗАЦИЯ МИТОХОНДРИИ

В системах с ограниченной мощностью энергетического обеспечения, а также в блоках электронных устройств с высокой плотностью рабочих элементов возникает проблема оптимизации энергетических затрат. Для повышения экономичности и надежности таких систем, по-видимому, могут быть использованы некоторые закономерности функциональной регуляции энергетики нервной клетки. Известны несколько путей адаптивного изменения продукции АТФ в митохондриях. Однако в бионическом аспекте наиболее важным является выявление таких общих закономерностей, которые позволили бы формализовать не биохимические и конформационные процессы регуляции отдельных митохондрий, а их взаимодействие как элементов единой энергетической системы клетки. Наблюдениями установлено, что функциональное состояние одиночного механизма механорецепторного нейрона рака в отдельных условиях может изменяться при постоянных тотальных энергетических затратах и неизменной общей активности окислительных ферментов, сопровождаясь лишь их пространственной реорганизацией и перераспределением митохондрий (1—3). В настоящей работе предпринята попытка выяснить значение функциональной реорганизации последних.

Методики исследования дыхания, активности цитохромоксидазы (ЦХО) и распределения митохондрий на изолированном одиночном нейроне речного рака при электрофизиологическом контроле функционального состояния подробно описаны в [1—4]. Динамику потребления кислорода регистрировали методом осциллографической полярографии [2]. Положение кончика микроэлектрода над поверхностью сомы нейрона контролировали под микроскопом. Активность ЦХО изучали цитохимическим методом на тотальных препаратах симметричных нейронов (один из них в ином функциональном состоянии служил контролем) при непосредственной фотосъемке их под микроскопом после достижения оптимальной окраски [4]. Для оценки динамики реорганизации митохондрий проводили фотосъемку живого нейрона, окрашенного янус-грюн, на разных сроках до, во время и после воз-

действия. Фотонегативы анализировали на установке «ПРОТВА-3» [5, 6] или сканировали на денситометре ИФО-451 с последующей обработкой квантованных денситограмм на ЭВМ БЭСМ-4 [7]. Шаг квантования выбирался меньше размеров митохондрии: в первом случае — 0,5 мкм (100 мкм на фотонегативе) и 0,6 мкм (2 мкм на денситограмме) — во втором: для вычисления спектральной функции — 0,25 мкм. Сканирование по площади зондом 0,5 мкм проводилось по клетке в целом (каждый фотонегатив — 4840 измерений) и по зонам сомы: дендритной между ядром и дендритами; ядерной (митохондрий над и под ядром) и аксонной (между ядром и аксонным холмиком). При анализе целого нейрона преобразование изображения клетки $0 < f(x, y) < M$ в последовательность электрических импульсов $\{f_1, f_2, \dots, f_N\} = [\varphi(f)]_{(x,y)}$ представляет собой пространственно-инвариантную операцию [8]. Функции $f_i (i = 1, \dots, N)$ подвергались функциональному преобразованию T_1, T_2, \dots, T_m , при этом каждое значение f_i относилось к определенному квантованному уровню по коэффициенту пропускания фотонегатива нейрона. Аналитически эта операция выражается формулой

$$T_i(f) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [u(x_i - f_k) - u(x_{i+1} - f_k)], \quad i = 1, 2, \dots, m,$$

где $u(x)$ — единичный скачок:

$$u(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0, \\ 0, & x < 0; \end{cases}$$

$X_1, X_2, \dots, X_i, X_{i+1}, \dots, X_m$ — квантованные уровни по коэффициенту пропускания фотонегатива. Получаемое частотное распределение коэффициентов пропускания является аппроксимацией его плотности вероятности. На основании этого эмпирического распределения вычисляли его центральные моменты.

При спектральном анализе [5, 9] необходимо выделять относительно однородные участки, удовлетворяющие условиям стационарности и эргодичности. Такими участками оказались дендритная, ядерная и аксонные зоны сомы нейрона, которые сканировали по направлению от дендритов к аксону и поперек.

Анализ интенсивности флюктуации PO_2 над поверхностью сомы нейрона позволяет выделить два этапа в ответе нейрона на функциональное воздействие. Первый, составляющий около двух минут, характеризуется усилением флюктуации PO_2 по сравнению с фоновыми и совпадает со сроком стабилизации частоты импульсной активности нейрона. Второй, характеризующийся затуханием флюктуаций PO_2 до уровня фоновых, представляет собой стационарное состояние нового режима функции нейрона.

Важно отметить, что именно переходный процесс по показателям потребления кислорода и изменения электрической активности совпадает с наиболее заметной пространственной реорга-

низацией митохондрий, выявляемой при машинном анализе; причем если изменяется переходный этап регуляции дыхания, то соответственно при данном воздействии задерживается перестройка митохондрий до их относительно стабилизированной организации в новом функциональном режиме нейрона. Рассмотрим это более подробно на примере реорганизации митохондрий при сильном адекватном раздражении механорецепторного нейрона рака, сопровождающегося блоком импульсной активности. При сходстве основных закономерностей в этом варианте опытов период релаксационных колебаний микроструктуры более длителен, чем при слабом адекватном воздействии, не сопровождающемся блоком импульсации, или торможении иным способом.

Первый момент, связанный с концентрацией митохондрий и условиями фотосъемки, — математическое ожидание во всех вариантах опытов в целом по клетке практически не меняется. Изменение второго D_x и третьего S_k центральных моментов одного из характерных экспериментов данной серии показано на рис. 1. Увеличение дисперсии D_x означает возрастание числа градаций оптической плотности, т. е. образование относительно более светлых и более темных участков в общей картине распределения митохондрий на фотонегативе клетки. Причиной этого может быть увеличение неравномерности их распределения или агрегации.

Крупные агрегаты митохондрий образуют на фотонегативе более светлые участки, чем наибольшие их скопления, а освобожденные от них участки цитоплазмы — более темные. Увеличение коэффициента асимметрии S_k означает преобладание темной фазы над светлой и, следовательно, уменьшение площади, занимаемой митохондриями в соме нейрона. Это может быть вызвано агрегацией митохондрий и набуханием сомы нейрона. Изменения D_x и S_k в первые пять минут воздействия свидетельствуют о перестройках митохондрий преимущественно в сторону большей агрегации. Однако этот процесс носит колебательный характер. С отставанием по фазе развивается другой процесс — гидратация сомы нейрона. Нормализация к десятой минуте уровня D_x при сохранении увеличенного значения S_k свидетельствует о прекращении агрегации митохондрий и о значительной гидратации сомы нейрона, что доказывается визуально. Более длительный блок импульсации сопровождается дегидратацией сомы нейрона.

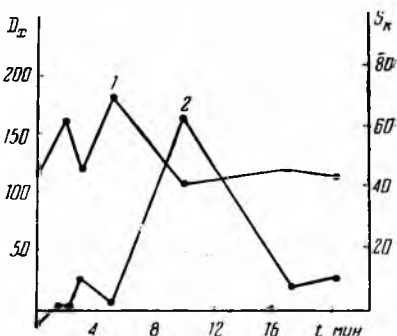


Рис. 1. Динамика дисперсии D_x (1) и коэффициента асимметрии S_k (2) микроструктуры. Прижизненная окраска митохондрий в соме нейрона при торможении импульсной активности.

Отмеченные закономерности агрегации митохондрий подтверждаются корреляционно-спектральным анализом отдельных зон сомы нейрона. Исследование коэффициента вариации первых трех моментов от площади сканирования в пределах этих зон показало, что они удовлетворяют требованиям стационарности и эргодичности. О динамике изменения скрытых периодик в зоне между ядром и аксонным холмиком при торможении импульсации нейрона в этом же опыте можно судить по рис. 2.

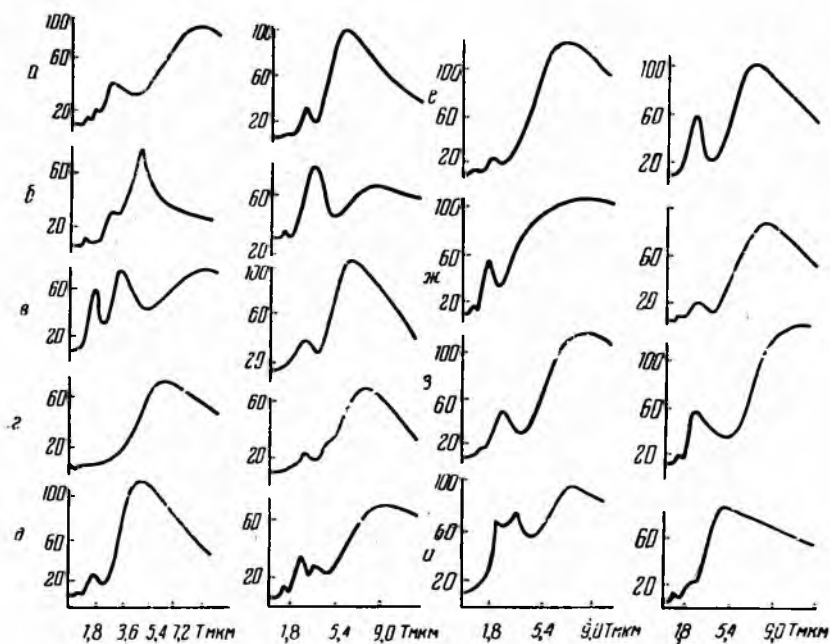


Рис. 2. Функции спектральной плотности сканограмм микроструктуры. Прижизненная окраска митохондрий аксональной зоны сомы нейрона при торможении импульсной активности. Слева — при сканировании вдоль аксо-дендритной оси, справа — поперек; а — исходное состояние возбуждения; б — через 1,5 мин торможения; в — 2 мин; г — 3 мин; д — 5 мин; е — 10 мин; ж — 17 мин; з — 20 мин; и — сразу после восстановления импульсной активности при прекращении раздражения.

Как видно из рисунка, спектральные функции вдоль аксо-дендритного направления и поперек имеют три максимума. Первый очень слаб (часто его вообще невозможно отличить), соответствует размерам одной митохондрии; второй четкий максимум (около 3 мкм) — группам митохондрий (от трех до пяти). Третий максимум, вероятно, отражает расстояние между этими группами. Увеличение второго и третьего максимумов и их сдвиг вправо свидетельствуют об агрегации митохондрий, а обратные измене-

ния — об их дезагрегации. Более высокие и острые пики указывают на четкую периодичность такой структуры, а слабо выраженный максимум — на распад размытости агрегатов митохондрий. Изменение спектральных функций в первые сроки затормаживания нейрона (1,5 мин) говорит о дезагрегации митохондрий: первый максимум по оси X уменьшается, а второй резко сдвигается влево.

Уменьшение расстояния между агрегатами митохондрий связано, по-видимому, с отрывом отдельных митохондрий от своих групп или с распадом последних. По оси Y особенно заметно снижение остроты второго пика. Однако уже на второй и третьей минутах торможения наблюдается агрегация митохондрий, ход которой претерпевает колебания, что соответствует изменению второго и третьего центральных моментов (см. рис. 1). Резкие структурные перестройки митохондрий характерны для пятой минуты торможения, что также подтверждает данные амплитудного анализа. Начиная с десятой минуты микроструктура стабилизируется и приближается к виду, близкому для исходного состояния. Наибольшие колебания величины и расположения максимумов указывают на динамичность организации в более узком диапазоне изменений, чем в первые сроки торможения. Характерно, что сдвиг первого максимума влево сопровождается увеличением остроты пика, и наоборот. Это свидетельствует о регулярных процессах поддержания, по-видимому, оптимальной для данного функционального состояния организации митохондрий. Правильность такого представления подтверждается и установлением постоянного значения дисперсии (см. рис. 1).

Каково же значение реорганизации митохондрий в сторону их большей агрегации или дезагрегации? При возбуждении нейрона, когда активизируется метаболизм, увеличиваются дыхание и активность окислительных ферментов, наблюдается большая агрегация митохондрий [2]. Данная закономерность была доказана электронномикроскопическими исследованиями этого же нейрона при возбуждении. Однако при торможении нейрона, как следует из приведенных выше результатов, а также другой серии опытов: торможением нейрона β -аланином, в первую фазу затормаживания, характеризующуюся еще более активными перестройками метаболизма в сторону его повышения, происходит, наоборот, дезагрегация митохондрий, и только во второй фазе, когда обмен снижается, как и при возбуждении, осуществляется их агрегация.

Для объяснения этого противоречия нами были проведены модельные опыты с разобщением дыхания окислительного фосфорилирования посредством 1 мМ 2,4-динитрофенола (ДНФ). Дефицит АТФ, вызванный ДНФ, обуславливает компенсаторное увеличение дыхания нейрона и включение тех регуляторных механизмов, которые в норме повышают продукцию АТФ. Оказалось, что при 20-минутном действии ДНФ изменения активности ЦХО в целом по клетке были статистически недостоверными. Однако в

аксонной зоне активность ЦХО снижалась, а в дендритной — возрастала. Уже этот факт свидетельствует о том, что увеличение дыхания нейрона может быть обеспечено лишь путем одной пространственной реорганизации метаболизма в соме нейрона.

При действии ДНФ в течение 20 минут наблюдалась заметная дезагрегация митохондрий по сравнению с их исходной организацией; второй пик, связанный с группировками митохондрий, заметно уменьшался, а первый, соответствующий размеру одной митохондрии, наоборот, возрастал (рис. 3).

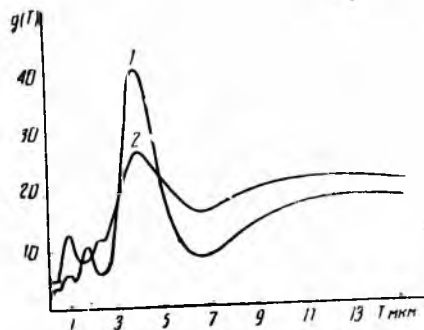


Рис. 3. Функции спектральной плотности сканограмм микроструктуры аксонной зоны сомы нейрона до (1) и после 20 минут воздействия 2,4-динитрофенолом (2).

Эти данные позволяют предположить, что дезагрегация митохондрий, уменьшая конкуренцию последних за субстраты окисления, способствует увеличению их суммарной энергетической продукции. Агрегация же митохондрий, вызывая контактное угнетение их активности, ограничивает рост энергетики в нервной клетке. Дезагрегация митохондрий, наблюдающаяся наиболее четко в фазу затормаживания, когда происходят срочное увеличение активности ЦХО и другие активные перестройки микроструктуры и метаболизма [1—3], может служить дополнительным оперативным механизмом мобилизации энергетических процессов в клетке. Дезагрегация митохондрий может наблюдаться также при некоторых условиях в состоянии возбуждения и при других воздействиях, если оказываются недостаточными по своей скорости или потенциальным возможностям другие менее лабильные, но более мощные механизмы регуляции энергетики в нейроне: увеличение суммарной активности окислительных ферментов, включение дополнительных и альтернативных путей метаболизма с преимущественным использованием новых источников и субстратов окисления, активация аэробного гликолиза и т. д.

Увеличение агрегации митохондрий, обнаруженное нами при стабилизации состояний возбуждения и торможения нейрона, по-видимому, можно рассматривать как средство оптимизации его энергетики, ограничивающее возможность повышения энергетического метаболизма за счет других механизмов выше необходимого уровня для данного функционального состояния. Выяснение конкретных связей между этими механизмами, в которых существенную роль играют гидратация сомы нейрона и митохондрий и их кальциевый обмен, может стать предметом специального рассмотрения. Однако дезагрегация митохондрий в соме

нейрона при длительном действии ДНФ, когда оптимизированное состояние энергетики нейрона становится недостижимым, делает наше объяснение механизма оптимизации энергетики весьма правдоподобным.

ВЫВОДЫ

1. Пространственная реорганизация митохондрий в виде изменения степени их агрегации сопровождается переходный процесс смены режимов физиологической деятельности нейрона.

2. Дезагрегация митохондрий служит одним из путей интенсификации энергетики нейрона, а увеличение агрегации митохондрий сдерживает усиление их дыхания и метаболизма.

3. Формирование стабильных агрегатов митохондрий в стационарном функциональном состоянии нейрона отражает достижение оптимизации его энергетики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Математический анализ распределения цитохромоксидазы в возбужденной и заторможенной нервных клетках. — «Докл. АН СССР», 1967, т. 177., № 1, с. 205—208. Авт.: А. Б. Коган, С. Л. Загускин, Б. М. Владимирский, Л. Д. Загускина.
2. Загускина Л. Д., Загускин С. Л. Об интенсивности колебаний потребления кислорода одиночной нейрорецепторной клеткой. — В кн.: Колебательные процессы в биологических и химических системах. Т. 2. Пушино-на-Оке, 1971, с. 157—160.
3. Загускина Л. Д. Пространственная реорганизация митохондрий, окислительного метаболизма и флюктуации дыхания при возбуждении и торможении нейрона. — В кн.: Пятая Всесоюз. конф. по нейрокибернетике, Ростов н/Д., Изд-во Рост. ун-та, 1973, с. 1068.
4. Загускин С. Л., Загускина Л. Д., Романько Э. П. Количественные оценки неспецифической окраски при различных условиях выявления активности цитохромоксидазы в нервной клетке. — «Цитология», 1973, т. 15, № 4, с. 423—431.
5. Богданов К. М. Метод количественного анализа морфологических структур на основе их статистических характеристик. — В кн.: Машинный анализ микроскопических объектов. М., «Наука», 1968, с. 21—31.
6. Установка «ПРОТВА-2М» для оптико-структурного машинного анализа микроструктур. — В кн.: Третье совещание по проблемам автоматизации анализа изображений микроструктур. Пушино-на-Оке, 1971, с. 16—18. Авт.: К. М. Богданов, Ю. Г. Козлов, Б. М. Пантелеев, К. А. Яновский.
7. Загускин С. Л., Владимирский Б. М. Статистические приемы анализа распределения цитохимических компонентов. — В кн.: Современные проблемы машинного анализа биологических структур. М., «Наука», 1970, с. 105—112.
8. Розенфельд А. Распознавание и обработка изображений. М. «Мир», 1972. 276 с.
9. Эм В. С. Интерпретация функций спектральной плотности при оптико-структурном машинном анализе. — В кн.: Статистические свойства микроструктур. М., 1971, с. 36—37.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНХРОННЫХ И АСИНХРОННЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ ГОЛОВНОГО МОЗГА. СООБЩЕНИЕ 1

Одна из проблем бионики — получение дополнительной полезной информации о нейрофизиологических процессах в целях их моделирования и практического применения. Рассмотрение в этом плане синхронных свойств электрической активности головного мозга с развитием микроэлектроники и АСУ становится особенно актуальным.

Пространственная организация синхронных и асинхронных потенциалов мозга свидетельствует о создании условий облегчения передачи возбуждения с афферентной системы на эффекторную [1]. Результатам изучения пространственного распределения синхронных и асинхронных потенциалов головного мозга, а также динамики координаций и взаимосвязанности синхронно-асинхронных систем с разными степенями свободы будет посвящен ряд сообщений.

Моделирование электроэнцефалограмм (ЭЭГ) началось в 1936 г., когда был сконструирован первый частотный анализатор [2]. Еще ранее в 1932 г. была предложена преформированная теория синхронной работы клеток [3], несостоятельность которой, однако, была доказана только через 30 лет [4]. В 1965 г. М. Н. Ливанов [5], используя метод суперпозиции, убедительно показал возможность формирования синхронных потенциалов в момент синтеза однонаправленных синфазных компонент нейронных импульсаций на некоторых амплитудных уровнях. Таким образом, была обоснована местная синхронизация, связываемая главным образом с ЭЭГ ритмикой.

Параллельно исследовалась дистантная, или пространственная синхронизация, заключающаяся в сходстве потенциалов в различных пунктах церебральных систем, структур и нейронных популяций.

Вначале анализ синхронных потенциалов производился визуально [6]. Топоскопический анализ [7] не устранил качественной оценки «переливов» амплитуды. Вследствие того, что при визуально-качественном анализе решающим является субъективный фактор, сохранились неточность и произвол заключений.

В конце 40-х начале 50-х гг. в Японии и США появились первые работы по корреляционному анализу ЭЭГ [8, 9]. Это позволило предложить векторэлектроэнцефалографический способ [10], дающий возможность ввести совместный оператор, характеризующий синхронность пары электрических процессов головного мозга.

В настоящее время моделирование пространственной синхро-

низации потенциалов производится в основном с помощью электроэнцефалоскопического [6], кросскорреляционного [11] и когерентного способов анализа. Особую актуальность приобретает проблема изучения пространственной организации потенциалов головного мозга после осуществления управляемого электрофизиологического эксперимента с применением ЭЦВМ [12].

Изучение локализованных электрических процессов во времени и пространстве является перспективным для выяснения вероятностной направленности и индивидуальных особенностей мозговой деятельности. Как отмечает М. Н. Ливанов [1], локализация даже простейших корковых функций не является точечной, но всегда представляется сложной и динамичной, отражающей взаимодействие многочисленных корковых и подкорковых систем. Сложность «архитектуры» электрических процессов и случайных событий требует также адекватного ей подхода в виде системного исследования. В связи с этим неизбежно возникают и соответствующие методические проблемы.

Поэтому предлагается система количественного анализа синхронных и асинхронных потенциалов, распределенных на двух и более участках головного мозга. Некоторые аспекты этой системы анализа, в частности описываемые переключательными функциями, изложены в данной работе.

Согласно предложенной системе, электроэнцефалограмма (ЭЭГ) представляет собой случайный процесс.

Исходя из этого, в дискретные моменты времени $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ на разных участках головного мозга можно выделить сочетания синхронных потенциалов, которые формируют признаки. Если амплитуда потенциалов равняется или превышает порог, так называемый уровень анализа, то производится подсчет символических единиц «1», которые представляют собой код данных потенциалов. Логический «0» равносителен ЭЭГ шуму и свидетельствует о наличии или отсутствии пульсации электрической активности мозга ниже уровня анализа.

Состояние участков, на которых появляются синхронные и асинхронные потенциалы, удобно характеризовать весом. В таком случае уровень анализа является как бы аналитическими весами, на которых «взвешиваются» потенциалы. Последние, достигнув уровня анализа или значительно превысив его, при кодировании становятся «одноразрядными», так как важно лишь зафиксировать его на уровне анализа.

Признаки определяются комбинацией потенциалов x_1, x_2, \dots, x_n . Их можно представить в виде переключательной функции $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, которая, в свою очередь, может принимать только два значения: «1» — при наличии потенциалов на уровне анализа и «0» — при их отсутствии.

Функцию $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ будем называть переключательной или нулевой, если она, как и ее аргументы-потенциалы, принимает «1» или «0».

При восьмиканальном отведении электрической активности 1, 2, 3, ..., 8 имеем переключательную функцию $f(x_1, x_2, \dots, x_8)$.

После того как потенциалы головного мозга будут закодированы на уровне анализа и проработаны, т. е. рассортированы по сочетаниям, получают вариационные ряды $C_8^1, C_8^2, \dots, C_8^8$.

Каждый ряд, объединяющий во времени $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ два, три и более синхронных потенциалов, соединяет несколько рядов по иерархическим рангам. Например, C_8^5 может включать $C_8^4, C_8^3, C_8^2, C_8^1$, но каждый из перечисленных нисходящих рангов не может включать C_8^5 , так как ранг C_8^5 в иерархической ступени выше, чем $C_8^4, C_8^3, \dots, C_8^1$. В свою очередь, C_8^4 может объединить признаки C_8^3, C_8^2, C_8^1 , но в состав признаков большего ранга войдет $C_8^5, C_8^6, \dots, C_8^8$. Поэтому признак вариационного ряда C_m^m может объединить признаки $C_m^{m-1}, C_m^{m-2}, \dots, C_m^1$, в свою очередь, включает признаки $C_m^{m-2}, C_m^{m-3}, \dots$ и т. д.

Это позволяет выявить трансформации пространственного распределения синхронных и асинхронных потенциалов, установить участки головного мозга, где синхронные и асинхронные потенциалы появляются стабильно либо неустойчиво, неопределенно или отсутствуют вовсе.

Количество признаков каждого вариационного ряда можно характеризовать переключательными функциями. Например, если признак вариационного ряда C_8^2 характеризуется появлением потенциалов на пороговом уровне анализа 2 и 5 ЭЭГ отведениях, то переключательная функция $f(x_1, x_2, \dots, x_8)$ при $x_2 = x_5 = 1$ имеет вид $f_1(0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0)$, или в лаконичной форме $f(x_2, x_5) = f(1, 1)$.

Переключательные функции, описывающие признаки закодированных синхронных и асинхронных потенциалов головного мозга, по аналогии с функциями, описывающими работу логических элементов, можно назвать элементарными или базовыми функциями.

Подстановка в переключательную функцию вместо аргументов потенциалов других функций называется суперпозицией. При анализе вариационных рядов $C_8^1, C_8^2, \dots, C_8^8$ можно характеризовать переключательные функции последующего ряда C_m^m функциями предыдущего ряда C_m^{m-1} . Например, функция $f(x_1, x_2, x_3)$ может характеризоваться функциями четырех форм:

1) признаками ряда C_8^1 :

$$f_1(x_1), f_2(x_2), f_3(x_3);$$

признаками рядов C_8^2 и C_8^1 :

2) $f_1(x_1, x_2), f_5(x_3)$:

$$3) f_8(x_1, x_2), f_7(x_2);$$

$$4) f_8(x_2, x_3), f_9(x_1) = f_1(x_1).$$

Тогда переключательную функцию $f(x_1, x_2, x_3)$ с использованием суперпозиции можно преобразовать соответственно:

$$1) f(f_1, f_2, f_3);$$

$$2) f(f_4, f_5);$$

$$3) f(f_6, f_7);$$

$$4) f(f_8, f_9).$$

Анализ полученных переключательных функций позволяет выявить особенности и нюансы пространственной организации синхронных и асинхронных потенциалов и, применяя минимизацию, составить логическую схему в наиболее оптимальной форме.

При суперпозиции необходимо предусмотреть возможные повторы, которые устраняются путем взаимного исключения. Всякая переключательная функция от меньшего числа потенциалов (или функций) включается в число функций большего числа потенциалов (или функций).

Совокупность потенциалов или функций, выступающих в качестве аргументов переключательной функции, называется набором. Каждый набор характеризуется одним временным моментом t_0, t_1, \dots, t_n . При кодировании образуются таблицы переключательных функций. Сами переключательные функции при этом образуют произвольный ряд потенциалов положительной и соответственно — отрицательной полярности. При ранжировании наборы переключательных функций раскомплектовываются по вариационным рядам. Каждому набору синхронных и асинхронных потенциалов головного мозга соответствуют сочетания пронумерованных ЭЭГ отведений. Количество наборов, на которых определяется переключательная функция n потенциалов, равно количеству различных n -разрядных двоичных чисел, т. е. 2^n . Число различных переключательных функций потенциалов ЭЭГ отведений равно 2^{2^n} . Переключательная функция потенциалов 8 ЭЭГ отведений определена набором рядов $C_8^1, C_8^2, C_8^3, \dots, C_8^8$.

Синхронные и асинхронные потенциалы одной или противоположной полярности, а также их отсутствие на уровне анализа в некоторый временной момент двух и более ЭЭГ отведений может характеризоваться шестнадцатью переключательными функциями, используемыми как стандарт в пороговой логике. Эти функции позволяют отразить сложную пространственно-временную организацию потенциалов головного мозга и анализировать их в истинном значении времени с помощью логических схем. Техническая задача при этом сводится к набору логических элементов, отражающих указанную систему распределения синхронных и асинхронных потенциалов головного мозга. Анализ электрической активности головного мозга можно производить системой переключательных функций, которая как можно полнее будет воспроизводить пространственное распределение потенциа-

лов, если произвольную переключательную функцию представить суперпозицией функций этой системы.

При проектировании устройства, анализирующего распределение синхронных и асинхронных потенциалов, желательно, чтобы система переключательных функций на заданном уровне анализа отражала и наличие, и отсутствие потенциалов во всех отведениях и сочетаниях, имела по возможности хотя бы одну нелинейную, немонотонную или самодвойственную переключательную функцию. В результате можно будет анализировать потенциалы не только одной, но и противоположной полярности одновременно, а также подойти к созданию предпосылок для «горизонтального» анализа на пороговом уровне.

Этот анализ позволит установить степень синхронизации, асинхронизации и отсутствия потенциалов не только их одномоментной системы, представляемой «вертикальной» синхронизацией, но и одного ЭЭГ отведения, определяя объемные соотношения совокупностей потенциалов. Тогда выявятся не только доминирующие факторы пространственной структуры распределения потенциалов, но и будут сформированы существенные временные отношения между синхронными и асинхронными свойствами ЭЭГ.

Логические операции над потенциалами головного мозга необходимы для оптимального кодирования и выявления их вероятностных сочетаний при внешних и внутренних возмущениях. На первом этапе разработки системы анализа можно ограничиться переключательными функциями отдельных логических операций.

Логические операции дизъюнкции и конъюнкции наиболее эффективны и повсеместно применяются в пороговой логике. В процессе апробирующего анализа ЭЭГ достаточно использовать одну из этих логических операций. При операции логического умножения длительность импульса τ_n каждого синхронного потенциала равна эквипотенциальному отрезку. При кодировании потенциалов в плане вариационных рядов $C_m^n, C_m^{n+1}, \dots, C_m^{n+k}, \dots$ отдается предпочтение конъюнкции, так как в этом случае сохраняется комбинационное многообразие, характерное для дизъюнкции.

Вследствие эквивалентности возможны эквивалентные преобразования алгоритмов логического умножения с выходом на переключательные функции дизъюнкции; выявляется динамика изменений пространственно-временных ЭЭГ свойств.

Конъюнкция n потенциалов x_1, x_2, \dots, x_n тождественна единице, если каждый из потенциалов равен или превышает уровень анализа, соответствующий логической «1». Переключательные дизъюнктивные функции по форме могут быть аналогичны, т. е., согласно системе анализа, отражать совокупность сочетаний закодированных потенциалов, но, по существу, воспроизводить иные свойства электрической активности головного мозга.

Если в один и тот же момент времени сравниваются потенциалы разной полярности, то при анализе их может быть использована операция инверсии, или отрицания. Это зависит от трактовки, т. е. от выбранной схемы анализа.

При рассмотрении на уровне анализа синфазных, асинфазных и противофазных потенциалов двух и более ЭЭГ отведений в разных сочетаниях, образующих при кодировании признаки (по структуре переключательной функции), сначала выполняются операции отрицания, затем — конъюнкции и, наконец, дизъюнкции. Операция инверсии имеет существенное значение при учете полярности, потому что «0» одной полярности означает логическую «1» для другой.

На основании изложенного анализ ЭЭГ может быть автоматизирован посредством пороговых элементов.

При автоматическом анализе синхронные (синфазные или асинфазные на уровне анализа) потенциалы выделяются одновременно, так как предусматривается параллельное подключение пороговых элементов (ПЭ) «И» и «ИЛИ». Заметим, что потенциал одного ЭЭГ отведения в совокупности с другими при операции конъюнкции может формировать строго совпадающие во времени синхронные потенциалы. Вместе с этим тот же потенциал при операции дизъюнкции может комплектовать закодированный потенциал с рассогласованными на уровне анализа фазами. Для временного совпадения и рассогласования потенциалов разных участков мозга в моменты $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ в некоторых случаях вводится понятие реальных и мнимых фаз на уровне анализа. Под мнимой фазой можно понимать величину отсчета, которая совместно с реальной фазой на том же уровне позволяет производить логические операции. Действительное распределение фаз кодируемых потенциалов на том же уровне, как правило, значительно отличается.

После кодирования существо гомоморфной модели сохраняется таким, чтобы пространственное распределение закодированных синхронных и асинхронных потенциалов головного мозга не изменилось. Например, переключательная функция, используемая для характеристики потенциалов одной полярности по отношению к другой, выражена формулой

$$f(\overline{x_1, x_2, \dots, x_n, v}) = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n, v).$$

Функция f составлена так, что потенциалы связаны только операциями дизъюнкции, конъюнкции и отрицания. Поэтому после кодирования в выражении для f везде знак дизъюнкции можно заменить на знак умножения. Наоборот, взяв отрицание от каждой переменной x_1, x_2, \dots, x_n можно получить отрицание данной переключательной функции.

При гиперсинхронизации производится логическое умножение потенциалов на уровне анализа по всем ЭЭГ отведениям.

Анализ структуры признаков низшего ранга по отношению к признакам высшего можно описывать вхождением одного в другой либо вхождением части одного признака в структуру другого признака более высокого ранга. Это позволяет установить приоритет появления синхронных или асинхронных потенциалов на тех или иных участках головного мозга. Например, две переключательные функции φ_1 и φ_2 , создающие структуру признаков называются сравнимыми, если для них выполняется одно из следующих условий: $\varphi_1 \subset \varphi_2$ при $\varphi_1 < \varphi_2$ или $\varphi_2 \subset \varphi_1$ при $\varphi_2 < \varphi_1$.

Для получения сокращенной дизъюнктивной нормальной формы переключательной функции, характеризующей синхронные асинхронные потенциалы головного мозга, можно использовать множество алгоритмов. Один из них осуществляется методом Квайна, основанным на преобразовании совершенной дизъюнктивной нормальной формы с помощью операций неполного склеивания и поглощения. Эти операции производятся после кодирования потенциалов положительной x_1, x_2, \dots, x_n и отрицательной $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n$ полярности двух (xy) и более ЭЭГ отведений в целях оптимальной технической реализации.

Так, операция полного склеивания четырех ЭЭГ отведений потенциалов положительной и отрицательной полярности после минимизации может определяться соотношением

$$xy \vee \bar{xy} = x.$$

В таком случае принято, что потенциалы, расположенные на разных участках головного мозга при минимизации, согласно терминологии пороговой логики, склеиваются по потенциалу y . Справедливость данного выражения вытекает из преобразований используемых при минимизации:

$$xy \vee \bar{xy} = x(y \vee \bar{y}) = x1 = x.$$

Операцию поглощения можно определить по формуле

$$x \vee yx = x(1 \vee y) = x1 = x.$$

Это означает, что при характеристике временных свойств электрической активности в первом приближении достаточно рассмотреть свойства потенциалов x , чтобы охарактеризовать пространственно-временные отношения трех ЭЭГ отведений.

При анализе структуры признаков в случае неявной, неопределенной выраженности распределения синхронных и асинхронных потенциалов на исследуемых участках головного мозга можно использовать операцию развертывания, по смыслу обратную операции склеивания.

Минимизация при помощи эквивалентных преобразований закодированных синхронных и асинхронных потенциалов позволяет рационально синтезировать логические схемы, необходимые для автоматического анализа пространственной организации потенциалов, локализовать кодирующий аппарат, вскрыть особенности структуры пространственного распределения потенциалов, которые существующими способами количественного анализа обнаружить не удастся.

Как показывает апробация ранее упомянутых аспектов анализа, изучение синхронных и асинхронных потенциалов, создающих на поверхности регистрируемых участков причудливые мозаики сочетаний, свидетельствует о том, что в период «успокоения» психотерапевтического воздействия по сравнению с ЭЭГ фона и фотостимуляции испытуемого меняются веса признаков: четче вырисовываются параллельные констелляции обеих сторон, особенно височно-затылочные, ярче обнаруживается «диагональная ось» — максимум в левом затылочном отведении, минимум — в правом лобном.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ливанов М. Н. Пространственная организация процессов головного мозга. М., «Наука», 1972. 137 с.
2. Loomis A., Harvey E., Hobbart G. Electrical potentials of the human brain.— «J. Exp. Psychol.», 1936, vol. 9, p. 249.
3. Kornmüller A. Architectonische Lokalisation bioelectrischer Erscheinungen auf der Grosshirnrinde.— «Ltschr. Psychol. u Neurol.», 1932, Bd 44, S. 447.
4. Jasper H.—In: Proc. Intern. Physiol. Sci. XXII Intern. Congr. Physiol., Leined, 1962, pt 1, p. 932.
5. Ливанов М. Н. Нейрокинетика.— В кн.: Проблемы современной нейрофизиологии. М.—Л., «Наука», 1965, с. 37—72.
6. Lilly J. C.— In: EEG clin. Neurophysiol., 1950, vol. 2, p. 358.
7. Ливанов М. Н., Ананьев В. Л. Электроэнцефалоскопия. М., Медгиз, 1960, с. 10—45.
8. Imahory K., Suhara K. On the statistical method in the brain waves study.— «Fol. Psychiatr. neurol. Jap.», 1948—1949, vol. 1, N 3, p. 137.
9. Brazier M., Casby J. Grosscorrelation and auto-correlation studies electroencephalographic potentials.— «EEG a clin. Neurophysiol.», 1952, vol. 4, N 2, p. 201.
10. Гринявичус К., Гутман А., Иокубаускас В. Однополярное распределение ЭКЭГ кролика.— В кн.: Материалы I Прибалт. конф. центр. науч.-исслед. лабораторий мед. ин-тов и факультетов. Каунас, 1965, с. 109.
11. Проблемы пространственной синхронизации биопотенциалов головного мозга. Под ред. акад. М. Н. Ливанова. (Материалы симпозиума, Пушкино-на-Оке, 9—11 июля 1971 г.). Пушкино-на-Оке, 1973. 151 с.
12. Ливанов М. Н. Электронно-вычислительная техника в изучении головного мозга. (О некоторых возможностях применения ЭВМ в электрофизиологическом эксперименте).— «Вестник АН СССР», 1968, № 7, с. 60—68.

В. Г. АБДУЛА, Ю. П. БУГАЙ, канд. техн. наук, В. А. БАХТИГОЗИН,
В. Г. ЧЕРВОВ, канд. биол. наук

ОПТИКО-ТЕЛЕВИЗИОННАЯ МОДЕЛЬ РЕЦЕПТИВНЫХ ПОЛЕЙ ЗРИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗАТОРА

При решении задач распознавания изображений полезным может оказаться рассмотрение закономерностей обработки информации в зрительных анализаторах животных и человека. В процессе длительной эволюции животного мира в зрительных анализаторах различных животных сформировались нейронные функциональные образования, так называемые рецептивные поля, предназначенные для эффективной обработки поступающей информации.

В работе [1] описано телевизионное устройство для моделирования рецептивных полей. В телевизионной модели могут быть реализованы простейшие интегральные и дифференциальные преобразования, осуществляемые в зрительной системе рецептивными полями. В частности, телевизионная система дает возможность осуществить такие операции, как инвертирование видеосигналов, их дифференцирование и интегрирование, управление уровнем сигнала и ограничение его по амплитуде. Интегральные и дифференциальные операции осуществляются в телевизионной модели путем использования апертур различной формы, которые ставятся в соответствие функциям влияния рецептивных полей зрительного анализатора.

Однако, несмотря на указанные достоинства телевизионных моделей, в них невозможно простыми средствами получить апертуры любой необходимой формы.

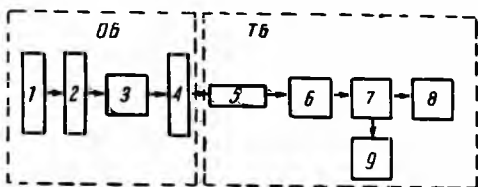
В работе [2] предложены оптические модели рецептивных полей зрительного анализатора, в которых функции влияния рецептивных полей любой формы реализуются путем использования в оптической системе апертурных масок. В отличие от телевизионной системы, в которой сканируется изображение, в оптической системе изображение обрабатывается практически мгновенно параллельным способом. В свою очередь, оптически моделирующие системы при использовании в них некогерентного света не позволяют воспроизводить в модели знакопеременные функции влияния рецептивных полей.

В настоящей работе рассматривается комбинированная оптико-телевизионная моделирующая система, которая сочетает в себе возможности телевизионных и оптических систем (рисунок). Она может быть использована в качестве моделирующего устройства воспроизводящего процессы фильтрации и надежного помехоустойчивого кодирования в зрительном анализаторе. Оптический блок ОБ системы, состоящий из элементов 1—4, позволяет осуществлять интегральные преобразования типа свертки с любым положительным ядром. Необходимый закон распределения

точечного элемента входного изображения (ядро преобразования) в оптическом блоке реализуется посредством апертурной маски 4.

В режиме фильтрации выходной сигнал системы, соответствующий наличию искомого признака в предъявляемом изображении, формируется в ее телевизионном блоке ТБ, состоящем из элементов 5 — 9, путем выделения видеосигнала, превышающего определенный пороговый уровень. При наличии выделяемого признака во входном изображении от порогового устройства 7 срабатывает исполнительный орган 9. В режиме кодирования выходной сигнал системы формируется на экране индикатора 8.

Полное преобразование входного сигнала, осуществляемое оптико-телевизионной системой, может быть представлено в виде соотношений:



Блок-схема оптико-телевизионной моделирующей установки:

1 — источник диффузного немонахроматического света (осветитель, конденсор, матовое стекло); 2 — диапозитив входного изображения; 3 — объектив передающей телевизионной камеры; 4 — апертурная маска; 5 — передающая телевизионная трубка; 6 — блок видеусилителя; 7 — пороговое устройство; 8 — индикатор; 9 — исполнительный орган.

для пороговой реакции системы

$$P(\vec{x}) = \iint_{R^2} I(\vec{x}^n) G(\vec{x}, \vec{x}^n) d\vec{x}^n; \quad (1)$$

для надпороговой реакции системы

$$Q(\vec{x}) = [P(\vec{x}) - c] I [P(\vec{x}) - c], \quad (2)$$

где $I(\vec{x}^n)$ — входной сигнал;

$$G(\vec{x}, \vec{x}^n) = \iint_{R^2} G_1(\vec{x}, \vec{x}') G_2(\vec{x}', \vec{x}^n) d\vec{x}'$$

— функция влияния полного преобразования;

$G_1(\vec{x}, \vec{x}')$ — функция влияния преобразования в оптическом блоке ОБ;

$G_2(\vec{x}, \vec{x}^n)$ — функция влияния преобразования в телевизионном блоке ТБ;

c — пороговый уровень порогового устройства 7.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотренное оптико-телевизионное моделирующее устройство в отличие от систем, описанных в [1], позволяет осуществлять интегральные преобразования с положительными ядрами любой пространственной конфигурации.

2. С учетом возможности многократного дифференцирования видеосигналов в блоке видеусиления в рассматриваемой системе могут быть реализованы интегральные преобразования с анизотропными дифференциальными ядрами. Это дает возможность, с одной стороны, в режиме фильтрации выделять контуры предъявляемых изображений, а с другой — в режиме кодирования реализовать знакопеременные функции влияния, необходимые для надежного по мехоустойчивого кодирования передаваемого сигнала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нефедов Ю. И., Червов В. Г., Бугай Ю. П. Моделирование процессов первичной обработки информации в зрительном анализаторе с помощью телевизионной системы. — В сб.: Проблемы бионики. Вып. 3. Харьков, Изд-во Харьк. ун-та, с. 142 — 148.
2. Оптические модели детекторов признаков зрительных сигналов. — В сб.: Проблемы бионики. Вып. 11. Харьков, Изд-во Харьк. ун-та, 1973, с. 40—44. Авт.: Ю. П. Бугай, В. А. Бахтигозин, Ю. И. Зозуля, В. Г. Червов.

УДК 621.383.8 : 681.142.36

Ю. И. НЕФЕДОВ, канд. техн. наук

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ.

СООБЩЕНИЕ I

Решение многих практически важных задач автоматического анализа и распознавания изображений связано с выделением полезной (целевой) информации по определенным, заранее установленным признакам, т. е. с пространственно-временной фильтрацией изображений. Последнюю принято рассматривать как важнейшую подготовительную операцию максимизации отношения сигнал — помеха при распознавании зрительных образов. Эта операция облегчает принятие решения о наличии и положении искомого объекта в поле зрения в каждый момент времени.

Реакцию пространственно-временного фильтра $u(x, y, t)$ на входное возмущение $I(x, y, t)$ можно найти из соотношения для пороговой операции свертки [1]:

$$u(x, y, t) = [I(x, y, t) * Q(x, y, t)] \times \\ \times 1 [I(x, y, t) * Q(x, y, t) - C], \quad (1)$$

где $Q(x, y, t)$ — весовая функция фильтра;

C — величина порога.

Введение порога на выходе фильтра позволяет отсеять шум и выделить полезный сигнал.

Весовую функцию пространственно-временного фильтра можно представить в виде произведения

$$Q(x, y, t) = Q_1(x, y) Q_2(t), \quad (2)$$

в котором $Q_1(x, y)$ — пространственная компонента весовой функции (ответ на δ -импульс Дирака);

$Q_2(t)$ — временная компонента весовой функции (импульсная реакция).

Если в системе отсутствует пространственная иррадиация возмущения, т. е. $Q_1(x, y) = 1$, то такая система является фильтром временных сигналов. Когда же в системе не учитывается влияние импульсного возмущения на состояние системы в последующие моменты времени, т. е. когда $Q_2(t) = 1$, то такая система является пространственным фильтром изображений. Реакция пространственного фильтра $u(x, y)$ на входной сигнал $I(x, y)$ может быть найдена из соотношения

$$u(x, y) = [I(x, y) * Q_1(x, y)] \times \\ \times 1 [I(x, y) * Q_1(x, y) - C]. \quad (3)$$

Таким образом, пространственную и временную фильтрации можно рассматривать как частные случаи фильтрации пространственно-временных сигналов.

Конкретный вид весовой функции предопределяет все функциональные возможности пространственно-временного фильтра. Однако отыскание весовых функций по известным реакциям и входным сигналам является чрезвычайно сложной задачей. Некоторые соображения относительно вида весовых функций ряда пространственно-временных фильтров могут быть высказаны на основании данных нейрофизиологических исследований зрительной системы [2, 3]. Математические и телевизионные модели нейронных структур, отвечающие этим данным, позволили подробно изучить функциональные свойства ряда пространственно-временных фильтров и уточнить их весовые функции [2—6].

Пространственно-временная фильтрация изображений может осуществляться как программным путем на ЭВМ, так и с помощью специальных оптических и электронных устройств. Если задача обработки изображений требует быстрого решения, то для пространственно-временной фильтрации целесообразно использовать электронные или оптические устройства.

Для построения электронных фильтров могут использоваться стандартные телевизионные системы [3, 5, 6]. Телевизионные пространственно-временные фильтры имеют преимущества по сравнению с оптическими. Рассмотрим некоторые из них.

1. Использование телевизионных фильтров для оперативной обработки поступающей информации в реальном масштабе времени не сопряжено с какими-либо трудностями. При оптической пространственно-временной фильтрации обычно требуется предварительная регистрация изображений на фотоматериалах.

2. Телевизионные системы позволяют одновременно с фильтрацией изображений осуществлять преобразование пространственного оптического сигнала во временной электрический сигнал,

что имеет большое значение при использовании ЭВМ для следующей обработки данных.

3. На телевизионных системах, в отличие от оптических легко реализуются пороговые операции, дающие возможность выделять сигналы определенной интенсивности.

4. На телевизионных системах сравнительно легко реализуются временные компоненты весовых функций пространственно-временных фильтров.

Перечисленные преимущества оказываются решающими при необходимости оперативной (быстрой) обработки поступающей информации [3, 7].

В соответствии с выражением (1) синтез телевизионного пространственно-временного фильтра осуществляется по следующему алгоритму:

1) реализуются пространственная и временная компоненты весовой функции фильтра;

2) значения сигналов в каждой точке входного изображения умножаются на весовую функцию фильтра;

3) в каждой точке телевизионного раstra производится пространственно-временное интегрирование найденных выше произведений;

4) полученный интегральный сигнал выделяется из шума.

Рассмотрим основные способы реализации данного алгоритма.

Весовая функция пространственно-временного фильтра может быть синтезирована в передающей или приемной телевизионной трубке. Форма апертуры сканирующего луча трубки всегда определяет пространственную компоненту весовой функции. Различные формы апертур могут быть получены путем специальной расфокусировки электронного луча [8, 9] либо посредством программной перемещения луча по определенному закону [3, 5, 10]. С помощью линий задержек и регистров можно строить многоэлементные апертуры [11, 12]. Для программной перемещения луча используются высокочастотные синусоидальные напряжения, которые вместе с пилообразными напряжениями разверток подаются на отклоняющую систему трубки. Синусоидальные сигналы создают локальные высокочастотные развертки электронного луча, т. е. формируют апертуры определенной конфигурации. Форма апертуры задается пространственной компонентой весовой функции фильтра. Подбирая определенные значения амплитуд, частот и разности фаз синусоидальных напряжений, подаваемых на отклоняющие системы, можно синтезировать апертуры любой нужной формы [3, 5].

Умножение весовой функции на входной сигнал осуществляется при сканировании мишени передающей трубки апертурой коммутирующего луча. В приемной трубке такое умножение выполняется при модуляции яркости сканирующей апертуры видеосигналом. Умножение весовой функции на входной сигнал будет производиться в каждой точке раstra, если частота синусоидального сигнала совпадает с частотой развертки.

социальных напряжений превысит частоту строчной развертки, не менее чем в 200 раз.

Для синтеза временных компонент весовых функций пространственно-временных фильтров могут использоваться две передающие трубки с различными инерционностями [6, 18], дифференцирующие трубки [14], вычитающие потенциалоскопы [15] и передающие трубки, имеющие световую характеристику $u_{\text{вых}}(E)$ с положительной и отрицательной крутизной [16, с. 390].

Накопление энергии на мишенях передающих трубок и на запоминающих люминесцентных поверхностях приемных трубок позволяет приближенно воспроизвести в каждой точке телевизионного раstra пространственно-временное интегрирование произведений весовой функции и входного сигнала. При этом важно, чтобы информация о поступающем изображении сохранялась на накопительной поверхности трубки в течение времени, превышающего период кадровой развертки. Данное условие всегда может быть выполнено в запоминающих трубках (потенциалоскопах). Для выполнения этого условия в передающих или приемных трубках без длительной памяти необходимо с учетом инерционности или времени послесвечения трубки правильно выбрать частоту кадровой развертки.

После реализации свертки следует выделить полезный сигнал из шума. Такую пороговую операцию можно осуществить путем ограничения уровня видеосигнала на выходе передающей трубки либо ограничением уровня яркости приемной трубки.

Пространственное интегрирование на экране приемной трубки

Упрощенная блок-схема телевизионной системы, предназначенной для пространственной фильтрации изображений, имеет передающую камеру ПК, блок низкочастотных разверток БНР, включающий синхрогенератор и генераторы строчной и кадровой разверток, блок высокочастотных разверток БВР, предназначенный для синтеза весовых функций (апертур) пространственного фильтра, видеоконтрольное устройство ВУ (рис. 1). Данная телевизионная система может использоваться для выделения из контурных изображений прямых линий определенной ориентации, углов, линий заданной кривизны и разнообразных фигур сложной конфигурации.

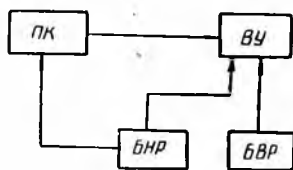


Рис. 1.

Весовую функцию пространственного фильтра — детектора ориентированных прямых можно записать в виде δ -функции, заданной на прямолинейном, ориентированном под углом α к оси абсцисс [3] отрезке длиной a :

$$Q_1(x - x_0, y - y_0) = \delta[(x - x_0) \sin \alpha + (y - y_0) \cos \alpha] \times$$

$$\times \left\{ 1 \left[(x - x_0) \cos \alpha - (y - y_0) \sin \alpha + \frac{a}{2} \right] - 1 \left[(x - x_0) \cos \alpha - (y - y_0) \sin \alpha - \frac{a}{2} \right] \right\}. \quad (4)$$

Апертуру, соответствующую данной весовой функции, можно реализовать, подавая на отклоняющую систему приемной трубки высокочастотные синусоидальные напряжения с БВР. Раздельная регулировка амплитуды этих напряжений на вертикальной и горизонтальной отклоняющих системах трубки позволяет изменять угол наклона прямолинейной апертуры и, следовательно, выделять прямые линии любой нужной ориентации.

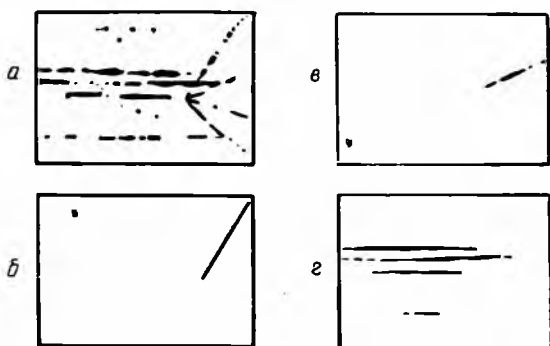


Рис. 2.

Фотоснимок треков был получен с пузырьковой камеры (рис. 2, а). Это изображение обрабатывалось на телевизионной системе. После пространственной фильтрации также производилось фотографирование (рис. 2, б—г). Сравнение изображения, предъявляемого на входе телевизионной системы (рис. 2, а), с изображениями, формируемыми на экране ВУ (рис. 2, б—г) позволяет сделать следующий вывод: телевизионный пространственный фильтр с весовой функцией (4) может использоваться для выделения полезного сигнала из шума, определения принадлежности отдельных зерен одному треку и ориентации треков. Данная система позволяет также измерять углы между треками и кризизну треков.

По аналогии с весовой функцией детектора ориентированных прямых весовую функцию пространственного фильтра, выделяющего углы, можно представить в виде суммы двух δ -функций, заданных на сторонах угла одинаковой длины a :

$$Q_1(x - x_0, y - y_0) = \delta[(x - x_0) \sin \alpha_1 + (y - y_0) \cos \alpha_1] \times \\ \times \left\{ 1 \left[(x - x_0) \cos \alpha_1 - (y - y_0) \sin \alpha_1 + \frac{a}{2} \right] - 1 \left[(x - x_0) \cos \alpha_1 - \right. \right.$$

$$\begin{aligned}
 & - (y - y_0) \sin \alpha_1 - \frac{a}{2} \Big] \Big\} + \delta [(x - x_0) \sin \alpha_2 + (y - y_0) \cos \alpha_2] \times \\
 & \times \left\{ 1 \left[(x - x_0) \cos \alpha_2 - (y - y_0) \sin \alpha_2 + \frac{a}{2} \right] - 1 \left[(x - x_0) \cos \alpha_2 - \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. - (y - y_0) \sin \alpha_2 - \frac{a}{2} \right] \right\}, \quad (5)
 \end{aligned}$$

где α_1, α_2 определяют ориентацию сторон угла по отношению к оси абсцисс.

Апертуру луча, соответствующую данной весовой функции, можно синтезировать из высокочастотных синусоидальных напряжений. Для этого необходимо разделить синусоидальный сигнал на положительную и отрицательную составляющие и каждую из них использовать для формирования прямолинейной компоненты апертуры определенной ориентации [3].

Работу телевизионной системы в режиме выделения углов можно проиллюстрировать фотоснимками: на рис. 3, *a* показано входное изображение, а на рис. 3, *б* — изображение, формирующееся на экране ВУ.

Весовую функцию пространственного фильтра, выделяющего линии определенной кривизны, можно записать в виде δ -функции, сосредоточенной на окружности радиусом a [3]:

$$Q_1(x - x_0, y - y_0) = \delta \left[\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} - a \right]. \quad (6)$$

Данная весовая функция, умноженная на возмущение, преобразует каждую точку последнего в окружность такого же радиуса. Если он равен радиусу кривизны возмущения, то в центре кривизны все окружности пересекутся, образуя интегральный сигнал большой величины [3].

Апертуру луча приемной трубки, соответствующую весовой функции детектора кривизны (6), можно синтезировать, подавая с *БВР* на горизонтальную и вертикальную отклоняющие системы трубки напряжения одинаковой амплитуды и частоты, но сдвинутые по фазе относительно друг друга на 90° . В результате сложения таких взаимно-перпендикулярных колебаний создается круговая апертура. Ее радиус зависит от амплитуды сигналов, подаваемых с *БВР*.

Работу телевизионной системы в режиме выделения линии определенной кривизны также иллюстрируют фотоснимки (рис. 4).

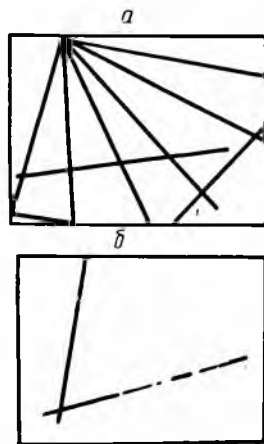


Рис. 3.

Обработке подвергалось изображение в виде окружностей различного радиуса на фоне помех (рис. 4, а). На фотоснимках, полученных с экрана ВУ (рис. 4, б, в), видны лишь точки, соответствующие центрам выделяемых окружностей. Радиус выделяемой окружности равен радиусу круговой апертуры, сканирующей изображение.

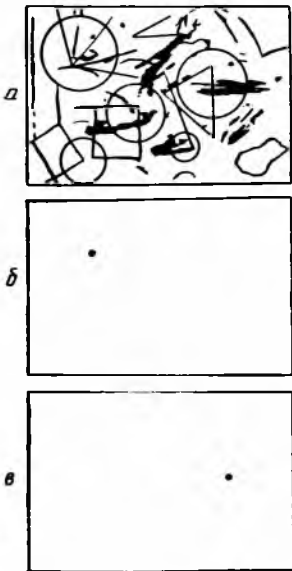


Рис. 4.

Для выделения из изображений фигур, образуемых линиями различной кривизны, необходимо сканировать изображение апертурной, имеющей конфигурацию выделяемой фигуры. Апертуры сложной формы могут быть синтезированы из синусоидальных сигналов [17].

Телевизионные системы, в которых пространственная фильтрация осуществляется на экране приемной трубки могут использоваться для выборочной индикации визуальной информации [3]. Применение таких систем индикации облегчит условия наблюдения и повысит эффективность работы оператора

ЛИТЕРАТУРА

1. *Caianiello E. R.* Outline of a theory of thought processes and thinking machines. — «J. Theoret. Biol.», 1961, vol 1, p 98 — 104.
2. *Marko H.* Die Anwendung Nachrichtentheoretischer Methoden in der Biologie. «Electronische Informationsverarbeitung und Kybernetik», 1969, Bd 5, H2, S. 3
3. *Нефедов Ю. И.* Исследование принципов переработки информации в зрительной системе и их использование при построении телевизионных пространственно-временных фильтров изображений. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Харьков. 1971. 26 с. (Харьковский институт радиоэлектроники).
4. Детектирование движения в сетчатке глаза лягушки. — В сб.: Проблемы бионики. Вып. 5. Харьков, Изд-во Харьк. ун-та, 1971, с. 30 — 37. Авт. Ю. И. Зозуля, Ю. И. Нефедов, В. Г. Червов, Ю. П. Бугай.
5. *Нефедов Ю. И., Червов В. Г., Бугай Ю. П.* Моделирование процессов неинвариантной обработки информации в зрительном анализаторе с помощью телевизионной системы. — В сб.: Проблемы бионики. Вып. 3. Харьков, Изд-во Харьк. ун-та, 1970, с. 142 — 148.
6. *Нефедов Ю. И., Червов В. Г., Абдула В. Г.* Телевизионная модель детектора движения. — В сб.: Проблемы бионики. Вып. 7. Харьков, Изд-во Харьк. ун-та, 1971, с. 85 — 89.
7. *Гуревич С. Б.* Теория и расчет не вещательных систем телевидения. «Энергия», 1970. 236 с.
8. *Нефедов Ю. И., Червов В. Г., Бугай Ю. П.* Исследование возможности изотропного выделения контуров изображений в телевизионной передающей системе. — В сб.: Радиотехника. Вып. 11. Харьков, Изд-во Харьк. ун-та, 1969, с. 156 — 163.

9. Горелик С. Л., Кац Б. М., Палатник Л. Н. Электроннооптический синтез пространственно-временных фильтров. — «Техника кино и телевидения», 1972, № 11, с. 53 — 56.
10. Нефедов Ю. И., Червов В. Г., Шатохин А. В. Устройство предварительной обработки изображений на входе цифровых вычислительных машин. В сб.: Проблемы бионики. Вып. 10. Харьков, Изд-во Харьк. ун-та, 1973, с. 125-129.
11. Межов Ф. Д., Серединский А. В., Цуккерман И. И. Телевизионные модели некоторых рецептивных полей. — «Проблемы физиологической оптики», 1966, т. 13, с. 136 — 141.
12. Серединский А. В., Цыкунова Т. М. О логической пространственной фильтрации телевизионных контурных изображений. — «Вопросы радиоэлектроники», 1965, сер. 9, вып. 3, с. 17 — 31.
13. Коновалов В. И. Пространственная фильтрация изображений с помощью логических апертур. — «Вопросы радиоэлектроники», 1966, сер. 9, вып. 1, с. 18 — 27.
14. Ахутин И. В. Преобразование оптических изображений дифференцирующей передающей телевизионной трубки. — «Оптико-механическая промышленность», 1969, № 4, с. 19 — 24.
15. Полоник В. С. Телевизионная автоматика. Л., «Энергия», 1970. 80 с.
16. Катус Г. П. Оптико-электронная обработка информации. М., «Машиностроение», 1973. 448 с.
17. Рейнберг М. Г. Формирование знаков на экране электроннолучевых трубок. М., «Энергия», 1969. 57 с.
18. Коут А. Машинная интерпретация изображений на экране радиолокатора. — В сб.: Проблемы бионики. М., «Мир», 1965, с. 385 — 404.

УДК 621.383.8 : 681.142.36

Ю. И. НЕФЕДОВ, канд. техн. наук, Л. А. ДУШИН, д-р физ.-мат. наук,
В. С. ТАРАН

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ И ВВОД В ЭВМ ОПТИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОГРАММ ПЛАЗМЫ

В связи с большим объемом вычислений интерферограммы, полученные при исследовании плазмы, целесообразно обрабатывать на ЭВМ [1].

Интерферограммы плазмы содержат большое количество избыточной информации, не используемой при обработке. Известные методы фильтрации избыточных данных на ЭВМ [1] сопряжены с большими затратами времени, что снижает эффективность всей обработки интерферограммы. Для того, чтобы машинная обработка интерферограмм была эффективной (т. е. осуществлялась за минимальное время с момента их предъявления), необходимо отсеять избыточную информацию до ввода интерферограммы в ЭВМ. Такую предварительную обработку всегда можно осуществить с помощью электронных или оптических пространственных фильтров, так как априори известны признаки, по которым отбирается полезная информация на интерферометрическом снимке. Данный принцип устранения избыточности входной визуальной информации заимствован у живых организмов. В зри-

тельных анализаторах человека и животных предварительная фильтрация избыточных данных осуществляется в сенсорных структурах, а в высшие отделы мозга поступают для дальнейшей обработки лишь данные о наиболее информативных элементах изображений [2, 3].

Выделение полезной (целевой) информации путем использования специальных пространственных фильтров позволяет повысить отношение полезного сигнала к помехам, сократить время и упростить алгоритмы обработки изображений [3, 4].

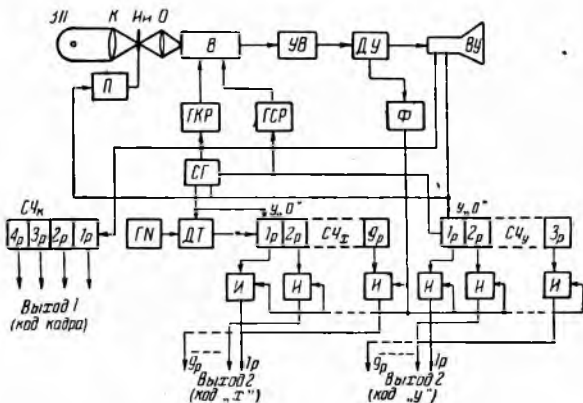


Рис. 1.

Информативными элементами интерферограмм, характеризующими изменение состояния плазменного объекта, являются те же криволинейные участки, т.е. отклонения интерференционных полос от прямолинейного направления (см. рис. 2, а). Выделение этих участков и формирование двоичных кодов их координат осуществляются в системе первичной обработки интерферограмм, блок-схема которой (рис. 1) содержит: проекционную лампу L со сферическим зеркалом $З$, конденсатор $К$, изображение освещенного кадра фотопленки с интерферограммой $И_n$, объектив O , видикон B типа ЛИ-420 с электростатическим отклонением луча, генератор строчной развертки луча видикона $ГСР$, генератор кадровой развертки $ГКР$, синхрогенератор $СГ$, усилитель видеосигнала $УВ$, формирователь Φ , дифференцирующее устройство $ДУ$, генератор импульсов $ГИ$, динамический триггер $ДТ$, двоичные девятиразрядные счетчики $СЧ_x$, $СЧ_y$, двоичный четырехразрядный счетчик кадров $СЧ_k$, схема совпадения $И$, электромеханическое устройство дискретной протяжки интерферограммы $П$, видеоконтрольное устройство $ВУ$.

В этой системе осуществляется автоматический покадровый анализ интерферограммы. Для перемещения кадров может использоваться стандартное устройство дискретной протяжки кадров, включающееся от синхроимпульсов $СГ$. Номер кадра фиксируется

сируется в двоичном счетчике $СЧ_k$. Изображение интерферограммы проектируется объективом O на фотокатод передающей трубки — видикона B . В системе используется построчное разложение изображения на 312 строк в кадре. Частота строчной развертки — 3 кГц, а кадровой — 10,4 Гц.

В дифференцирующем устройстве осуществляется двойное дифференцирование видеосигнала [5]. Это обеспечивает линейность фазовой характеристики системы, что дает возможность избежать нелинейных пространственных искажений. Амплитудно-частотная характеристика дифференцирующей схемы описывается уравнением

$$A(\omega) = 1 + k\tau^2\omega^2, \quad (1)$$

где τ — постоянная времени дифференцирующих цепочек;
 k — постоянный множитель, зависящий от коэффициентов передачи усилительных каскадов и величины τ .

Пространственный фильтр с данной частотной характеристикой, установленный в канале видеосигнала, подавляет нижние частоты ω_x (в направлении строк разложения), сохраняя без изменения частотные компоненты ω_y . Другими словами, в дифференцирующем устройстве выделяются контурные линии, перпендикулярные к направлению развертки, а также все те отрезки, проекция которых на указанное направление отличается от нуля. Поэтому, если расположить интерферограмму так, чтобы прямые линии (не несущие информацию) совпадали с направлением строк разложения, то в дифференцирующем устройстве видеосигналы от этих линий будут отсеяны.

Координаты выделенных участков изображения формируются в логической части системы, куда входят $ГИ$, $ТД$, $СЧ_x$, $СЧ_y$, I , $СЧ_k$.

Рассмотрим принцип формирования двоичных кодов координат. $ГИ$ формирует короткие прямоугольные импульсы, частота следования которых в 350 раз превышает частоту строчной развертки и составляет 1,05 мГц. Эти импульсы через $ТД$ подаются на счетный вход $СЧ_x$. Предварительно в конце строки разложения $СЧ_x$ устанавливается в нулевое состояние передним фронтом импульса гашения обратного хода строчной развертки $ИГС$, а по заднему фронту этого импульса запускается $ТД$. Таким образом, за время каждой строки разложения на выходе $СЧ_x$ формируются все двоичные коды 350. импульсов $ГИ$, т. е. коды всех возможных координат выделенных участков изображения. Двоичный код поступает на выход 2 лишь при наличии видеосигнала от выделенного элемента интерферограммы. Для этого используются схемы совпадения I , на один из входов которых подается общий разрешающий импульс, сформированный в Φ по дифференцированному видеосигналу.

Аналогично на выходе 3 формируются коды координат y выделенных участков изображения. Отличие состоит в том, что

в $СЧ_у$ ведется счет строк разложения по синхроимпульсам запуска ГСР.

Фотоснимок интерферограммы, полученный на плазменном коаксиальном ускорителе посредством интерферометра Рождественского с He—Ne лазерным осветителем и фоторегистрацией на СФР (рис. 2, а) предьявляется на входе системы. Так же был сделан фотоснимок с выделенными информационными участками данной интерферограммы, полученной с экрана ВУ (рис. 2, б).

Уменьшение избыточности информации можно оценить количественно.

Максимальное количество информации I_{\max} , которое может переработать данная система, определяется из соотношения [6, с. 30]

$$I_{\max} = nz \log_2 m, \quad (2)$$

где $n = 350$ — число элементов разложения в одной строке;

$z = 312$ — число строк разложения;

$m = 2$ — количество используемых градаций яркости.

Подставляя значения n , z , m в выражение (2), получаем

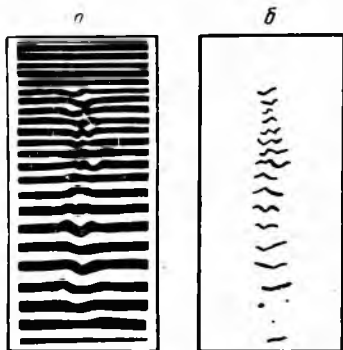


Рис. 2.

$$I_{\max} = 1,05 \cdot 10^6 \text{ дв. ед./кадр.}$$

Количество информации в телевизионном изображении интерферограммы, приведенной на рис. 2, а (при разложении на 312×350 элементов), составляет

$$I_a \approx 10^4 \text{ дв. ед./кадр.}$$

В изображении, формируемом на выходе дифференцирующего устройства (рис. 2, б), содержится $I_b \approx 870$ дв. ед./кадр.

Таким образом, использование дифференцирующего устройства позволяет (для данной интерферограммы) уменьшить избыточность подаваемой в ЭВМ информации в 11,5 раз.

Время, необходимое для обработки на системе одного кадра фотопленки с изображением интерферограммы, равно 0,1 с. Если для протяжки фотопленки использовать электромеханическое устройство с быстродействием 10 кадров/с, то максимальная пропускная способность системы составит 50 000 дв. ед./с. Точность определения координат в основном зависит от линейности пилообразных напряжений генераторов разверток, которая может быть доведена до 1%.

ВЫВОДЫ

1. Анизотропная пространственная фильтрация интерферограмм с помощью дифференцирующих устройств позволяет устранить избыточность информации, подаваемой в ЭВМ. Это приводит к упрощению алгоритмов и к минимизации времени последующей машинной обработки интерферограмм.

2. Рассмотренная система дает возможность автоматизировать процессы первичной обработки (фильтрации) и ввода интерферограмм в ЭВМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Обработка оптических интерферограмм на ЭВМ. — «Автометрия», 1971, № 4, с. 25—34. Авт.: И. И. Бурдонский, М. П. Гришин, Ш. М. Курбанов и др.
2. Цуккерман И. И. О вводе информации в мозг и в вычислительную машину. — В кн.: Информация и кибернетика. М., 1967, с. 199—215.
3. Нефедов Ю. И. Исследование принципов переработки информации в зрительной системе и их использование для построения телевизионных пространственно-временных фильтров изображений. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Харьков, 1971. 26 с. (Харьковский институт радиоэлектроники).
4. Левшин В. Л. Пространственная фильтрация в оптических системах пеленгации. М., «Сов. радио», 1971. 200 с.
5. Шейфис И. И. Способы улучшения качественных показателей видеотракта телевизионных центров. М., «Связь», 1967. 219 с.
6. Шмаков П. В. Телевидение. М., «Связь», 1970. 540 с.

УДК 62.506.2

В. И. ПОТАПОВ, В. Ф. НЕСТЕРУК

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АССОЦИАТИВНОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ИЗ ФОРМАЛЬНЫХ НЕЙРОНОВ

Основной целью работ [1—3], посвященных построению элементов и узлов цифровых вычислительных устройств (ЦВУ) из монофункциональных и реже — многофункциональных с переменным порогом формальных нейронов (ФН), является уменьшение структурной сложности, повышение надежности и быстродействия элементов и отдельных узлов ЦВУ из ФН по сравнению с аналогичными элементами и узлами, выполненными в других логически полных базисах. Однако применение таких элементов и узлов из ФН для построения ЦВУ с классической, например трехрегистровой структурой, по-видимому, не позволит в полной мере использовать логическую гибкость и функциональные возможности, потенциально заложенные в структуре ФН, для повышения эффективности ЦВУ.

К сожалению, структурные принципы построения ЦВУ из многофункциональных ФН с переменными весовыми коэффициентами синаптических входов и переменным порогом разработаны недостаточно, хотя их практическое использование может дать большой технико-экономический эффект [2, 3].

В связи с этим в настоящей работе рассматривается один из возможных принципов построения ЦВУ ассоциативного типа с поразрядной обработкой информации из многофункциональных ФН с переменными весовыми коэффициентами входов и переменным порогом, исследуются структурная сложность и эффективность подобного ассоциативного ЦВУ на примере ассоциативного множительного устройства (АсМУ).

Основные определения и понятия

Рассмотрим два множества $A = \{A_0, A_1, \dots, A_\nu, \dots, A_{2^n-1}\}$ и $B = \{B_0, B_1, \dots, B_\mu, \dots, B_{2^n-1}\}$, элементы которых A_ν и B_μ являются двоичными n -разрядными кодами, т. е.

$$A_\nu = a_0 a_1 \dots a_p \dots a_{n-1}, \quad a_p \in \{0, 1\};$$

$$B_\mu = b_0 b_1 \dots b_i \dots b_{n-1}, \quad b_i \in \{0, 1\}.$$

Очевидно, что элементы множества A и B можно рассматривать как наборы, состоящие из двоичных (логических) переменных, и как n -разрядные числа в двоичной позиционной системе счисления, равные соответственно

$$A_\nu = \sum_{p=0}^{n-1} a_p 2^p \quad \text{и} \quad B_\mu = \sum_{i=0}^{n-1} b_i 2^i.$$

Пусть L — некоторая (арифметическая или логическая) операция над элементами множества A и B . Тогда

$$L(A_\nu, B_\mu) = C_L = c_{0L} c_{1L} \dots c_{iL} \dots c_{m-1L},$$

где $c_{iL} \in \{0, 1\}$, а m — число разрядов кода результата операции L .

Для каждого набора j , L составим подмножество A_{jL} элементов множества A , обеспечивающих выполнение условия $c_{jL} = 1$ хотя бы для одного элемента B_μ множества B . Выберем из каждого подмножества A_{jL} для любого элемента B_μ подмножество A_{jL}^μ , некоторые из которых могут оказаться пустыми. Будем рассматривать каждый элемент $A_\nu \in A_{jL}^\mu$ как минтерм булевой функции n переменных, равной

$$F_{jL}^\mu = \bigvee_{A_\nu \in A_{jL}^\mu} A_\nu.$$

Тогда дизъюнкция элементов подмножества A_{jL} представляет собой функцию

$$F_{jL}^\mu = \bigvee_{\mu=1}^{2^n-1} F_{jL}^\mu.$$

Назовем B_μ эталоном функции F_{jL}^μ для данной операции L , $A_\nu \in A_{jL}^\mu$ — ассоциативным признаком равенства $c_{jL} = 1$ для фиксированного эталона B_μ , а A_{jL} — множеством ассоциативных признаков равенства $c_{jL} = 1$ для всех $B_\mu \in B$.

В соответствии со сказанным ассоциативным модулем будем называть одновыходной многофункциональный элемент с функциональными и управляющими входами, выходной сигнал которого равен единице при наличии на функциональных входах любого из минтермов A_j , каждой функции F_{jL}^{μ} , а на управляющих входах — кода соответствующего эталона B_{μ} и кода признака операции L .

Вычислительную структуру, состоящую из взаимосвязанных ассоциативных модулей, назовем ассоциативным вычислительным устройством (АсВУ).

Организация структуры АсВУ с поразрядной обработкой информации на формальных нейронах

Для упрощения рассуждений будем считать, что АсВУ предназначено для выполнения одной вычислительной операции ($L = \text{const}$).

Согласно изложенному, многофункциональные ФН с переменными весовыми коэффициентами синаптических входов и переменным порогом, имеющие ($1 \leq k \leq n$) функциональных и от 1 до 2^n управляющих входов, являются ассоциативными модулями, для которых каждое подмножество A_{jL}^{μ} соответствует логической функции F_{jL}^{μ} переменных. Каждый минтерм функции F_{jL}^{μ} является одним из ассоциативных признаков, вызывающих возбуждение j -го ФН при наличии на его управляющих входах кода эталона B_{μ} . Тогда регулярная (без обратных связей) одноранговая сеть, состоящая из m (m — число разрядов двоичного кода результата операции L) ФН, имеющих общие функциональные и объединенные соответствующим образом управляющие входы, представляет собой ассоциативное вычислительное устройство с поразрядной обработкой информации.

Синтез подобного АсВУ состоит из следующих этапов.

1. Определить для каждого j -го ФН регулярной одноранговой сети подмножество A_{jL} ассоциативных признаков, соответствующих операций L .

2. Выделить в каждом подмножестве A_{jL} для каждого эталона B_{μ} подмножество A_{jL}^{μ} .

3. Определить для каждого подмножества A_{jL}^{μ} соответствующую логическую функцию F_{jL}^{μ} и произвести ее минимизацию, исключив несущественные переменные.

4. Для каждой минимизированной функции F_{jL}^{μ} при каждом эталоне B_{μ} синтезировать j -й ФН, т.е. определить требуемые наборы весовых коэффициентов синаптических входов и пороги.

Если АсВУ предназначено для выполнения нескольких вычислительных операций ($L \neq \text{const}$), то для каждой операции проводится аналогичная описанной выше процедура синтеза структуры каждого j -го ФН, а в число управляющих входов вводятся шины признака операции.

Анализ структурной сложности и эффективности АсВУ из ФН

Получить в общем виде оценку структурной сложности и эффективности АсВУ, выполняющего произвольный набор вычислительных операций, не представляется возможным. Поэтому ограничимся рассмотрением АсМУ, предназначенного для вычисления 2^n -разрядного произведения $C \in \{0, 1, \dots, 2^{2^n} - 1\}$ двух n -разрядных сомножителей $A_\nu, B_\mu \in \{0, 1, \dots, 2^n - 1\}$. Очевидно, что подобное АсМУ состоит из $2n$ ФН с $1 \leq k \leq n$ функциональными и 2^n управляющими входами. Известно [4], что структурная сложность ФН зависит в основном от числа функциональных входов. Поэтому оценку структурной сложности АсМУ можно получить, определив минимальное необходимое число δ_j функциональных входов каждого j -го ФН, входящего в АсМУ.

Рассмотрим процесс определения $\min \delta_j, j = 1, 2, \dots, 2n$, для АсМУ.

Поскольку $C = A_\nu B_\mu$, для каждого $B_\mu \in \{0, 1, \dots, 2^n - 1\}$ можно определить $c_j(A_\nu)$ при изменении A_ν от нуля до $2^n - 1$.

Значение j -го разряда произведения определяется выражением

$$c_j = \left(\sum_{i=0}^{n-1} c_{ij} \right) \bmod 2 \oplus \left(\sum_{l=0}^{j-1} P_l \right) \bmod 2, \quad (1)$$

где $c_{ij} = a_{j-i} b_i 2^i, j \geq i$ — j -й член (справа налево) i -й строки (сверху вниз) матрицы частичных произведений вида

$$\left\| \begin{array}{cccccccc} 0 & \dots & 0 & a_{n-1} b_0 & \dots & a_1 b_0 & a_0 b_0 & \\ 0 & \dots & a_{n-1} b_1 & a_{n-2} b_1 & \dots & a_0 b_1 & 0 & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \\ a_{n-1} b_{n-1} & \dots & a_1 b_{n-1} & a_0 b_{n-1} & \dots & 0 & 0 & \end{array} \right\|; \quad (2)$$

P_l — значение переноса в j -й разряд произведения, возникающего при суммировании по $\bmod 2$ членов l -х столбцов ($l \leq j, j \geq 1$) матрицы (2).

Каждый член правой части выражения (1) является периодической функцией от A_ν . Действительно, нетрудно видеть, что $c_{ij} = 0$ при $b_i = 0$; $c_{ij} = a_{j-i} 2^i$ при $b_i = 1$. Следовательно, период функции $c_{ij}(A_\nu)_{B_\mu = \text{const}} = a_{j-i}(A_\nu) 2^i$ определяется периодом функции

$a_{j-i}(A_\nu)$ равным 2^{j-i+1} . Период же $\sum_{i=0}^{n-1} c_{ij}(A_\nu)$ определяется наименьшим общим кратным слагаемым $c_{ij}(A_\nu)$, т.е. периодом функции $c_{ij}(A_\nu) = a_j(A_\nu)$, равным 2^{j+1} для $j \leq n-2$, и периодом функции $c_{ij}(A_\nu) = a_{n-1}(A_\nu)$, равным 2^n для $j = n+i-1$.

Покажем теперь, что период функции $\sum_{l=0}^{j-1} P_l(A_\nu)$ равен 2^l .

Величина P_l определяется выражением

$$P_l = \left[\frac{\sum_{i=0}^{n-1} c_{li} + \sum_{p=1}^{l-1} P_{l-p}}{2^{l-1}} \right], \quad (3)$$

где $[X]$ — целая часть X , а P_{l-p} ($p < l$) — значение переноса из $(l-p)$ -го разряда в l -й разряд произведения.

При $l < 2$ $P_{l-p} = 0$, а при $l \geq 2$ $P_{l-p} \in \{0, 1\}$.

Пусть $l = 1$. Тогда соотношение (3) примет вид

$$P_1 = \left[\frac{\sum_{i=0}^{n-1} c_{1i}}{2^{j-1}} \right] \bmod 2. \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что период функции $P_1(A_v)$ равен периоду функции $c_{01}(A_v) = a_1(A_v)$.

При $l = 2$ выражение (3) примет вид

$$P_2 = \left[\frac{\sum_{i=0}^{n-1} c_{i2} + P_1}{2^{j-2}} \right] \bmod 2 \quad (5)$$

Отсюда следует, что период $P_2(A_v)$ равен наименьшему общему кратному периоду функций $c_{02}(A_v) = a_2(A_v)$ и $P_1(A_v)$, т. е. периоду функций $a_2(A_v)$.

Проводя аналогичные рассуждения, можно показать, что если период $P_{n-2}(A_v)$ равен периоду функции $a_{n-2}(A_v)$, то

$$P_{n-1}(A_v) = \left[\frac{\sum_{i=0}^{n-1} c_{i, n-1}(A_v) + \sum_{p=1}^{n-2} P_{n-1-p}(A_v)}{2^{j-n+1}} \right] \bmod 2$$

равен наименьшему общему кратному периодов функций $C_{0, n-1} \times (A_v) = a_{n-1}(A_v)$ и $P_{n-2}(A_v)$, т. е. периоду функции $a_{n-1}(A_v)$. Следовательно, $P_l(A_v)$ определяется периодом функции $a_l(A_v)$, равным $2^{l+1} = 2^j$ для $j \leq n-1$. Аналогично доказывается, что период функции $P_l(A_v)$ равен 2^n для $n \leq j \leq 2n-1$.

Таким образом, период функции $c_j(A_v)$ равен 2^{j+1} для $j \leq n-1$, а для $n \leq j \leq 2n-1$ равен 2^n . Легко заметить, что у двоичных кодов чисел $A_v \in \{0, 1, \dots, 2^{j+1}\}$, $j \leq n-2$, являющихся аргументами функции $c_j(A_v)$ в первом периоде, $j+1$ младших разрядов совпадают с $j+1$ младшими разрядами двоичных кодов чисел A_v последующих периодов, сдвинутых на период относительно чисел A_v первого периода. Поэтому для определения значения функции $c_j(A_v)$ достаточно проанализировать $j+1$ младших разрядов A_v .

Из проведенного выше анализа следует, что для реализации функции $c_j(A_v)$ при $j \leq n-2$ требуется ФН с числом функциональных входов $\delta_j = (j+1)$, а при $j \geq n-1$ — ФН с $\delta_j = n$.

Таким образом, для реализации АсВУ при n -разрядных операндах и $2n$ -разрядном произведении требуется $n-1$ ФН с $\delta_j = (j+1)$, $0 \leq j \leq n-2$ и $n+1$ ФН с $\delta_j = n$.

Для оценки эффективности АсМУ из многофункциональных ФН, по сравнению с базовым, например с классическим трехрегистровым устройством, выполненным из многофункциональных ФН, воспользуемся выражением вида

$$\Theta = \alpha \frac{k_t}{k_u},$$

где k_t , k_u — коэффициент увеличения быстродействия и коэффициент структурной избыточности АсМУ по сравнению с базовым множительным устройством; α — коэффициент пропорциональности. Очевидно, что АсМУ эффективнее базового множительного устройства при $\Theta > 1$.

Проведенные согласно выражению (6) расчеты при $\alpha = 1$, которые для краткости опущены, показали, что $\Theta > 1$, если $n \leq 6$, и $\Theta < 1$, если $n > 6$. При $\Theta = 1$ можно достичь $\max k_t = 6$. Очевидно, что изменение α , определяемого техническими условиями, и выбор иного базового множительного устройства приведут к изменению соотношений между Θ и n . При этом во всех случаях, когда значение $\Theta > 1$ достигается при $n < n^*$, где n^* — требуемая длина разрядной сетки операндов, необходимо синтезировать $\left[\frac{n^*}{n} \right]$ АсМУ для перемножения n -разрядных операндов, а их выходы подключить ко входам пирамидально соединенных многоразрядных комбинационных сумматоров, на выходах последнего из которых будет формироваться $2n$ разрядное произведение.

ЛИТ Е Р А Т У Р А

1. Мкртчян С. О., Потапов В. И. Синтез комбинационного сумматора на формальных нейронах. — В сб.: Проблемы бионики. Вып. 5. Харьков, Изд-во Харьк. ун-та 1971, с. 53—60.
2. Потапов В. И. Однородная вычислительная структура с плавающим резервом. — В кн.: Вычислительные системы и среды. Таганрог, 1972, с. 73—82.
3. Потапов В. И., Доценко М. Ф. Нейроподобные элементы в режиме восстановления органов — В сб.: Проблемы бионики. Вып. 10. Харьков, Изд-во Харьк. ун-та, 1973, с. 38—49.
4. Потапов В. И., Миренков П. В. О структурной сложности и технической реализации формальных нейронов на магнитных токовых переключателях. — Там же, с. 3—15.

УДК 62.506.2

С. И. ШАПИРО, канд. психол. наук

К ВОПРОСУ О КОДИРОВАНИИ ИНФОРМАЦИИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМОВ

В описанном эксперименте изучалось взаимодействие алгоритмических и эвристических составляющих в мышлении человека. В опыте участвовали 100 учащихся 9—10 классов средней школы.

Задача о «Ханойской башне». Перенести кольца со стержня A на B , используя в качестве вспомогательного стержень C . На любом стержне запрещается класть большее кольцо поверх меньшего (рис. 1).

Описательный язык: $1, 2, \dots, n$ — номера колец, если считать сверху вниз; $(+k)$ — перенос k -го кольца со стержня, на котором оно находится, на ближайший против часовой стрелки стержень; $(-k)$ — перенос по часовой стрелке ($k = 1, 2, \dots, n$) [1].

В эксперименте испытуемые усваивали алгоритм решения задачи индуктивно, проделывая каждый раз на бумаге предписанные действия. Приведем общие примеры.

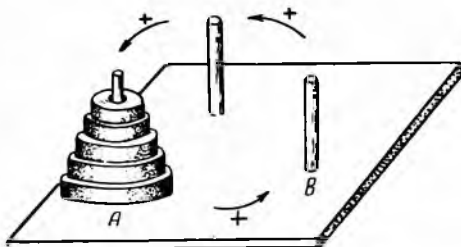


Рис. 1.

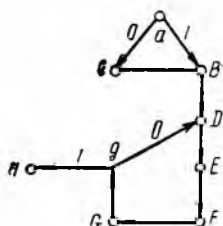


Рис. 2.

Число колец n Последовательность элементарных действий для решения задачи

1	+1
2	-1, +2, -1
3	+1, -2, +1, +3, +1, -2, +1
4	+1, -2, +1, +3, +1, -2, +1, -4, +1, -2, +1, +3, +1, -2, +1, +5
5	+1, -2, +1, +3, +1, -2, +1, -4, +1, -2, +1, +3, +1, -2, +1, +5

Испытуемым предложено продолжить таблицу для $n = 6$.

Мы предполагали, что задача будет решена с помощью одной из двух возможных стратегий.

I. Будет открыто правило построения индуктивного шага, сводящего каждый раз задачу к предыдущей. Рекурсивная формула при этом $\beta_{k+1} = (-\beta_k), (+\alpha_{k+1}), (-\beta_k)$, где $(-\beta_k)$ — последовательность взятых с противоположными знаками элементарных действий по переносу k колец; $(+\alpha_{k+1})$ — перенос одного $(k+1)$ -го кольца в положительном направлении, т. е. с A на B .

II. Испытуемые обнаружат в элементарных действиях правило построения β_k , которое можно задать следующим алгоритмическим предписанием в словесной форме.

1. Возьми первым отмеченным членом последовательности единицу со знаком плюс, если n нечетно, и минус — если n четно.

2. Для получения следующего отмеченного члена прибавь к абсолютной величине предыдущего единицу и возьми его со знаком, противоположным знаку предыдущего отмеченного члена.

3. Повтори, не изменяя порядка, члены, предшествующие текущему отмеченному члену.

4. Проверь, совпадает ли номер последнего отмеченного члена последовательности (т. е. его абсолютная величина) с числом колец на A . Если совпадает, остановись: последовательность построена. В противном случае вернись к указанию 2.

Поясним алгоритм на примере $n = 4$ (отмеченные члены последовательности выделены полужирным шрифтом):

N (содержание) указания	Соответствующая последовательность
1	—1
2	—1, 2
3	—1, 2, —1
2 < 4	
2	—1, 2, —1, —3
3	—1, 2, —1, —3, —1, 2, —1
3 < 4	
2	—1, 2, —1, —3, —1, 2, —1, 4
3	—1, 2, —1, —3, —1, 2, —1, 4, —1, 2, —1, —3, —1, 2, —1

Алгоритм в форме Ляпунова

Операторы, логические условия

Обозначения	Содержание
a	$a = \begin{cases} 1, & \text{если } n = 2l + 1, \\ 0 & \text{— в противном случае } (n=2l). \end{cases}$
B	Проставление первым отмеченным членом последовательности (+1).
C	Проставление первым отмеченным членом последовательности (—1).
D	Прибавление единицы к абсолютной величине предыдущего отмеченного члена.
E	Приписывание полученной сумме знака, противоположного знаку предыдущего отмеченного члена. Запись результата в качестве следующего отмеченного члена.
F	Повторение последовательности, предшествующей последнему отмеченному члену.
G	Сравнение абсолютной величины последнего отмеченного члена с общим числом колец
g	$g = \begin{cases} 0, & \text{если } k < n, \\ 1 & \text{— в противном случае } (k = n). \end{cases}$
H	Утверждение. Последовательность построена:

$$a \uparrow B \downarrow DEFGg \uparrow H. \downarrow C \uparrow. \quad (1)$$

Граф алгоритма (рис. 2)

Пример. Пусть $n = 3$; тогда $a = 1$ и, согласно оператору B , первый отмеченный член последовательности (+1) $\Rightarrow +1$.

Оператор D : прибавление 1 к +1.

E : (—2) $\Rightarrow +1, -2$.

F : повторение члена, предшествующего (—2) $\Rightarrow +1, -2, +1$.

$G: 2 < 3; g = 0$, переход к оператору D .

$D: 2 + 1 = 3; E: (+3) \Rightarrow +1, -2, +1, +3$.

F : повторение членов, предшествующих $(+3) +1, -2, +1, +3, +1, 2, +1$

$G: 3 = 3; g = 1$, в соответствии с оператором H последовательность построена $\Rightarrow 1, -2, 1, 3, 1, -2, 1$.

Прежде чем перейти к анализу результатов эксперимента, введем несколько понятий. Последовательность ходов, возвращающих ситуацию к исходной, например, последовательность $(\alpha_1(A, B); \alpha_1(B, A))$ или $(\alpha_1(A, B); \alpha_1(B, C); \alpha_1(C, A))$ назовем *циклом*.

Последовательность ходов, которая может быть заменена одним ходом, приводящим к той же ситуации, называется *петлей*. Например, $(\alpha_1(A, B), \alpha_1(B, C))$ может быть заменена одним ходом $\alpha_1(A, C)$. Устранение человеком цикла (петли) в процессе решения задачи назовем *срезанием цикла (петли)*.

Выдержка из протокола эксперимента с испытуемым $Ш$. (для удобства записываем ходы в условных обозначениях например: $\alpha_2(A, B)$ — перенос второго кольца с A на B . В действительности $Ш$. формулировал свои действия словесно).

От экспериментатора $Ш$. вначале отказался от обучающих последовательностей ($n = 1, 2, 3, 4, 5$), заявив, что «в такие бирюльки играл еще в детском саду». Он быстро решил задачу для $n = 1, 2, 3$, с некоторым затруднением — для $n = 4$. В последнем случае оказалось, что кольца упорядочены на стержне C , а не на B , как это требуется. Прошло не менее пяти минут, прежде чем испытуемому удалось «водворить» их на B , естественно, ценой избыточных ходов. Только после этого он заинтересовался обучающими примерами и сразу обнаружил закономерность: при нечетном n первый ход — $\alpha_1(A, B)$, при четном — $\alpha_1(A, C)$.

$Ш$. (Испытуемый предупрежден, что к каждому ходу он должен давать по возможности более полное обоснование): $\alpha_1(A, C)$, n — четно. (Показывает на схеме, какая конфигурация получится). Теперь $\alpha_2(A, B) \dots$

Экспериментатор. Объясните.

$Ш$. Больше делать нечего.

Экспериментатор: Можно еще $\alpha_1(C, A)$ или $\alpha_1(C, B)$.

$Ш$. Тогда не стоило снимать с A или надо было сразу переносить на B . (Срезание цикла и петли. — $C. Ш$.)

Экспериментатор: Дальше.

$Ш$. $\alpha_2(B, A)$ бессмысленно. (Цикл. — $G. Ш$.) Снимать с A некуда. Можно $\alpha_1(C, A)$ или $\alpha_1(C, B)$. Мне кажется, лучше $\alpha(C, B)$.

Экспериментатор. Почему?

$Ш$.: Хорошо, если $\alpha_1(C, A)$, то уже с A снимать неразумно. (Цикл или петля. — $C. Ш$.) Тогда остается $\alpha_2(B, C)$, от этого дело только затянется.

Экспериментатор. Неубедительно. Прошу Вас дальше.

Ш. Теперь начнем сначала — $\alpha_3(A, C)$. Постараемся первую пару перевести на C с помощью $A \dots$ (Два кольца мыслятся как нерасчлененная конструкция. — $C. Ш.$).

Экспериментатор. — Потом?

Ш. Четвертое кольцо на B и тройку с C на B , используя A , и т. д.

Таким образом, испытуемый «собственным ходом» пришел к рекурсивной формуле. Однако одно — привести последующую задачу к предыдущей, другое — выполнить построение в элементарных действиях переноса колец по одному. Достаточно испытуемому перейти к развертке, как сразу обнаруживается неполнота знания. Снова «на поверхность» выступают уже известные наводящие ориентиры: четность — нечетность n ; срезание циклов и петель. Они сознаются испытуемыми — в рассуждении содержатся явные ссылки на это. Речь идет о логических координатах. Есть, однако, одна логическая координата, которая управляет действием неявно, опосредованно, при неполном сознании. Ее можно сформулировать следующим образом. Предварительное упорядочение всех уже снятых колец на одном из стержней — B или C необходимо для отделения очередного кольца с A . Явно сослаться на эту координату Ш. (как и большинство других испытуемых) не в состоянии, хотя в своих действиях, несомненно, руководствуется ею.

Эксперимент показывает, что координата не вполне детерминирует умственные действия испытуемых и скорее выступает «в обличье» эвристики (особенно при больших значениях n), не избавляющей от ошибок, отклонений, петель, циклов. Отсюда, надо думать, — иллюзия «догадки», а не осознанного выхода к решению, отмеченная у многих испытуемых. Оказывается, решение задачи обязано взаимодействию в психологической модели перечисленных логических и эвристической координат. Эвристика играет главную роль в процессе свертывания рассуждений, приведения следующего к предыдущему. Речь идет о кодировании, обозначении свернутых систем действий укрупненным кодом, в котором решается задача. Однако при декодировании, переводе в исходный элементарный алфавит для выполнения фактического переноса колец необходимы дополнительно логические координаты. Подлинное кодирование, возникновение укрупненного внутреннего языка не исчерпывается сокращением рассуждения и действия. Представляется вероятым, что свертывание является лишь одной, хотя и очень важной эвристикой в процессе кодирования информации.

Заключая эту стадию эксперимента, можно сказать, что испытуемые в общем не воспользовались какой-либо одной из описанных выше стратегий. Оказывается, что человеческие механизмы мышления не приводятся к формальным описаниям [2]. В распознавании общего метода, «придумывания процедуры выигрышного решения» [1] испытуемые, как правило, приближались

к первой стратегии — с помощью эвристических составляющих, главным образом свернутого рассуждения и действия. При доводке идеи, развертке каждый раз на первое место выдвигаются те или иные логические координаты, которые в процессе актуализации «обрастают» системами элементарных умственных действий и приближают ко второй стратегии, хотя ни один из испытуемых этой стратегией явно не воспользовался.

Другой группе испытуемых алгоритм был сообщен сразу в свернутых формах. Задача эксперимента — изучить, как эти формы присваиваются, интериоризируются при синтезе внутреннего алфавита у человека, в частности в связи с его способностями к усвоению математики*.

Операторы: 1) простой: $\alpha_k(x, y)$ — перенос k -го считая сверху кольца со стержня x на стержень y ; 2) сложный: $\beta_k(x, y, z)$ — перенос k первых колец со стержня x на y , при этом z используется в качестве вспомогательного. Во всех случаях $x = A, B, C$; $y = A, B, C$; $z = A, B, C$; 3) простой: $i(+1)$ — оператор переиндексации, его содержание раскрыто ниже.

Обозначение операторов, логических вадачи условий Алгоритм решения Содержание операторов

	A	$\beta_2(A, B, C)$	
$a = \begin{cases} 1, & \text{если } 2 < n, \\ 0 & \text{— в противном случае} \end{cases}$	(2) F	$\left[\begin{array}{c} \rightarrow 2 < n \leftarrow \\ \text{Задача решена} \\ \beta_2(B, C, A) \leftarrow \\ \alpha_3(A, B) \\ \beta_2(C, B, A) \\ -i(+1) \end{array} \right]$	Перенос первых (верхних) двух колец со стержня A на B при вспомогательном стержне C. Сравнение числа 2с данным числом колец на стержне A. Если неравенство выполняется, то как показывает стрелка, переходят к оператору $\beta_2(B, C, A)$; в противном случае выполняется следующее указание — задача решена.
B	C		Перенос третьего кольца со стержня A на B.
C	D		Перенос двух колец с C на B с помощью A.
D	E		Увеличение индексов во всех предыдущих указаниях на единицу и в соответствии со стрелкой — возврат к сравнению.
E			

Алгоритм в форме Л. — Ш.:

$$A \overset{2}{\downarrow} \alpha \overset{1}{\uparrow} BCDE \overset{2}{\parallel} \overset{1}{\parallel} F. \quad (3)$$

Содержание исходного сложного оператора $\beta_2(x, y, z)$ (выражение через элементарный оператор α):

$$\beta_2(x, y, z) = \begin{cases} \alpha_1(x, z), \\ \alpha_2(x, y), \\ \alpha_1(z, y), \end{cases}$$

* Испытуемыми являлись учащиеся 9—10 классов средней школы с математическим уклоном, которым автор в течение нескольких лет преподавал математику [3].

например:

$$\beta_2(A, B, C) = (\alpha_1(A, C); \alpha_2(A, B); \alpha_1(C, B));$$

$$\beta_2(B, C, A) = (\alpha_1(B, A); \alpha_2(B, C); \alpha_1(A, C));$$

$$\beta_2(C, B, A) = (\alpha_1(C, A); \alpha_2(C, B); \alpha_1(A, B)).$$

После каждого цикла вследствие переиндексации оператор усложняется:

$$\beta_3(x, y, z) = (\beta_2(x, z, y); \alpha_3(x, y); \beta_2(z, y, x)) = (\alpha_1(x, y);$$

$$\alpha_2(x, z); \alpha_1(y, z); \alpha_3(x, y); \alpha_1(z, x); \alpha_2(z, y); \alpha_1(x, y)),$$

например:

$$\begin{aligned} \beta_3(x, B, C) &= (\beta_2(x, z, y); \alpha_3(x, y); \beta_2(z, y, x)) = \\ &= (\alpha_1(A, B); \alpha_2(A, C); \alpha_1(B, C); \alpha_3(A, B); \alpha_1(C, A); \\ &\quad \alpha_2(C, B), \alpha_1(A, B)); \end{aligned}$$

$$\beta_3(B, C, A) = (\beta_2(B, A, C); \alpha_3(B, C); \beta_2(A, C, B))$$

и т. д.

Процесс описывается рекурсивной процедурой

$$\beta_{k+1}(x, y, z) = (\beta_k(x, z, y); \alpha_{k+1}(x, y); \beta_k(z, y, x)).$$

Обратимся к эксперименту по обучению учащихся решению задач с помощью алгоритма (3). Уже начиная с $n = 3$ у испытуемых при пользовании алгоритмом возникли затруднения. Дело в том, что для $n = 2$, к которому данный случай приводится, перенос происходит с A на B с помощью C . Теперь же, когда оператор β_2 стал промежуточным этапом в решении задачи $\beta_3(A, B, C)$, его необходимо «обернуть», дважды изменить направление действия: сначала перенос с A на C с помощью B ($\beta_2(A, C, B)$), затем после $\alpha_3(A, B)$ — с C на B при посредстве A ($\beta_2(C, B, A)$). Чтобы β_2 срабатывал в любом варианте, в психологической модели человека необходима особая переключаемость мышления, основанная на обобщенном характере последовательности действий, формализованных в операторе. А это, оказывается, не всегда имеет место. В итоге, когда задача уже решена, некоторые испытуемые неожиданно обнаруживают, что перенесли кольца «не на тот стержень». Чем больше значение n , тем отчетливее проявляется дефект. Можно предположить, что в мышлении этих испытуемых оператор β не стал собственным неразложимым символом внутренней речи, средством не только выражения, но и формирования обобщенной мысли, обобщенного действия. Перестройка всякий раз требует специальных дополнительных усилий для раскрытия и анализа структуры. Свертывание, навязываемое алгоритмом, не завершается у них образованием нового, сокращенного алфавита, т. е. «внутренним» кодированием.

Приведем выдержку из протокола эксперимента с участием испытуемого П. (ограниченные математические способности). Его рассуждения следующие: «Два кольца легко перенести: первое на *B*, второе на *C*... Наоборот, первое на *C*, второе на *B*, потом первое с *C* на *B*. (Пишет, какое кольцо на каком стержне находится)... Теперь три... Два перенесем, это мы знаем. (Создается впечатление, что двушаговая операция $\beta_2(x, y, z)$ свернулась в одноэлементную. — *С. Ш.*) ... Третье кольцо — на *C*, больше некуда. Как его «поддеть» в *B* под низ? ...?»

Теперь испытуемому, ясно, что первые два кольца следовало переносить не на *B*, а на *C*. С большим трудом (четыре неудачные попытки) он реализует замысел, хотя перед этим легко произвел аналогичный перенос с *A* на *B*. Задача о возврате колец с *C* на *B* оказалась П. не под силу, и после нескольких безуспешных проб он отказался от ее дальнейшего решения.

Таким образом, справившись с переносом двух колец с *A* на *B*, испытуемый не в состоянии сделать решение общим методом. Свертывание у него не сопровождается обобщением. А без этого, по-видимому, невозможно перекодирование, мысленное обозначение структуры единым символом, который срабатывает одинаково во всех родственных ситуациях. В итоге, как показывает эксперимент, при увеличении числа колец П. вынужден каждый раз «начинать с нуля», т. е. развертывать структуру в элементарные действия*.

«Крупноблочного» решения задачи не получается. Более того, развивается цепной процесс: с одной стороны, испытуемый вынужден решать задачу развернуто из-за неспособности к формированию внутреннего, укрупненного алфавита, и, с другой, обилие элементарных действий «уводит» его от центральной логической координаты — рекурсивной закономерности, как бы усиливая неспособность к кодированию. В этом плане отметим, что некоторые испытуемые, выполнившие конструкцию для четырех — пяти колец, оказались не в состоянии повторить ее по требованию экспериментатора. Значит, метод решения все-таки не усвоен, и для каждого значения *n* задача фактически решается как новая, независимая. В действиях испытуемых проявилось отсутствие определенной стратегии — блуждание, «видение» только с близкого расстояния, неумение пересмотреть, исправить «на ходу». Естественно, что при больших значениях *n* ($n > 6$) задача, как правило, оставалась нерешенной.

Для сравнения рассмотрим решение, осуществленное учащимся Д. с явными математическими способностями.

Д. (Мышление вслух, переносятся три кольца): «... Два — на *C*, третье — на *B*, кольца на *C* меньше, чем на *A*. Используя

* Нетрудно заметить принципиальное сходство между решением задачи П. и действием ЭВМ, работающей по готовой программе в аналогичных условиях.

A как вспомогательный стержень, по-прежнему переносим перые кольца с *C* на *B*. (Показывает, как это сделать.)

Как видим, в целом мышление испытуемого моделируется алгоритмом (3) решения задачи. Кроме того, с учетом конкретных начальных условий — переноса трех, а не двух колец выбран наиболее адаптивный, экономичный вариант приведения: $(\beta_2(A, C, B), \alpha_3(A, B); \beta_2(C, B, A))$. Наряду с алгоритмом, как бы «на ним» у испытуемого обнаруживается неформализованное δ -приращение, позволяющее каждый раз включать то значение обобщенного оператора, которое является оптимальным в сложившейся ситуации. Важно отметить, что в приведенной выдержке из протокола решения *D*. изложен общий план, мысленная конструкция учащегося, которая не сопровождалась непосредственным переносом колец. Оказывается, в случае необходимости она разворачивается, доводится почти без дополнительных психических усилий. Эксперимент показывает, что при отчуждении мысли от физического исполнения (пусть даже на бумаге), опережении умственным действием моторного акта возможно обнаружение закономерности, синтез главной логической координаты. Это оказывается также условием формирования внутреннего алфавита, отличного от алфавита элементарных действий, в котором фактически осуществляется перенос колец.

ВЫВОДЫ

1. Умственные действия человека отличаются от машинных операторов тем, что кодирование в них — не формальный процесс образования множественных структур и их обозначения, а создание собственного внутреннего языка. Чем более развито математическое мышление учащихся, тем сильнее сказывается в нем «человеческое».

2. Эвристические методы, имеющие полуалгоритмический характер, «вписываются» как в индивидуальные особенности человеческого мышления, так и в формально заданные программы.

Выявление конкретных эвристик, используемых человеком при решении отдельных типов задач, откроет путь к моделированию некоторых элементов мышления на ЭВМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бенерджи Р. Теория решения задач. Пер. с англ. М., «Мир», 1972. 224 с.
2. Шапиро С. И. О моделировании механизма формирования понятий у человека в вероятностной ситуации. — В сб.: Проблемы бионики. Вып. 13. Харьков, «Вища школа», 1974, с. 140—149.
3. Шапиро С. И. Психологический анализ структуры математических способностей в старшем школьном возрасте. — В кн.: Вопросы психологии способностей. М., «Педагогика», 1973, с. 90—129.

НОВЫЙ МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ НЕПРЕРЫВНЫХ ВРЕМЕННЫХ ФУНКЦИЙ

Основными операциями при разделении на классы являются: а) выделение из сигнала и представление в виде кода наиболее существенной информации; б) нормирование кода в целях получения инвариантов. Наиболее эффективно эти задачи решаются биологическими анализаторами. Поэтому изучение и использование в технике информационных механизмов сенсорных систем представляется весьма перспективным.

В результате проведенных исследований, а также анализа известных нейрофизиологических данных разработан алгоритм экономичной дискретизации непрерывных сигналов $\{x(t)\}$ и предложен способ нормирования полученного время-импульсного кода. Приведем их описание.

Возбудимость нервной ткани

Вследствие адаптации уже на уровне одиночного нейрона дискретизация непрерывных сигналов производится одновременно с компрессией данных. Нейронные ансамбли с иерархичной структурной организацией образуют системы, позволяющие чрезвычайно эффективно уплотнять данные по мере восходящего анализа (примерно в 10^7 раз [1]). Ни один из известных в технике алгоритмов дискретизации сигналов не обеспечивает сжатия без потери существенной информации.

Изучение возбудимости нервной ткани дает возможность выявить эффективные механизмы кодирования и анализа сигналов. Сигнал — поток энергии, организованный определенным образом, служит для нервной ткани средством передачи информации. Преимущественное значение энергетической или информационной компоненты сигнала определяется спецификой приемного канала. Сведения о функциональном отличии между афферентными нервными каналами указывают, что первые реагируют главным образом на информативные компоненты сигнала, вторые — на энергетические.

Возбудимость W нервной ткани зависит от ряда параметров сигнала; в большой мере она определяется амплитудой, площадью и крутизной фронтов сигнала:

$$W = W [x(t_i), \int x(t) dt, x'(t)].$$

В экспериментах на нервно-мышечном аппарате удалось показать [2], что возбудимость ткани обусловлена также второй производной от раздражающего сигнала $x''(t)$, влияние которой обнаруживается в области инфранизких частот. Амплитуда и пло-

падаь сигнала связаны с разрешающей способностью живого объекта. Следовательно, эти компоненты сигнала относятся к энергетическим показателям. Производные $x'(t)$, $x''(t)$ отражают форму сигнала и, значит, относятся к информативным показателям.

Как показал эксперимент [2], наибольшую значимость в сигнале-раздражителе для нервной ткани имеют моменты, когда $x'(t)$, $x''(t)$ претерпевают изменения. Действительно, эти участки сигнала наиболее информативны, поскольку обладают максимальной неопределенностью. Использование этих данных предполагает эффективное решение первой задачи классификации.

Время-импульсное кодирование

Метод основывается по возможности разложения непрерывного сигнала на информативные компоненты. В общем виде требуется доказать, что

$$x(t) = A_1 x'(t) + A_2 x''(t) + \dots + A_n x^n(t). \quad (1)$$

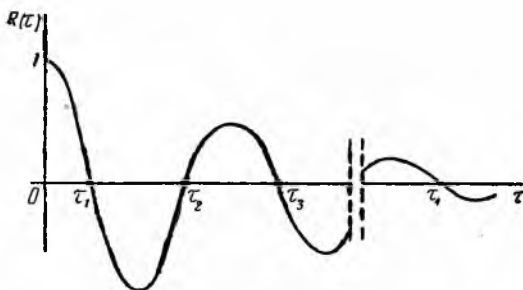


Рис. 1. Корреляционная функция.

Теорема о разложении сигнала в ряд из его производных доказана в [3] для стационарных случайных процессов с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией, дифференцируемых n раз. Смысл доказательства кратко сводится к следующему.

Пусть корреляционная функция $R(\tau)$ процесса имеет переходы через нуль и $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_i, \dots, \tau_{n-1}$ — моменты пересечения ее с осью времени (рис. 1). Разложим производные сигнала $x(t)$ до n -го порядка включительно в ряд, составленный из функций

$$x(t), x(t - \tau_1), \dots, x(t - \tau_i), \dots, x(t - \tau_{n-1}), \quad (2)$$

которые рассматриваются как квазиортогональные, поскольку, согласно теореме Хинчина [4], $R(\tau)$ аппроксимируется экспоненциально-косинусной функцией и тогда

$$\int x(t - \tau_i) x(t - \tau_j) dt \approx 0.$$

Следовательно, можно составить систему уравнений

$$\begin{aligned} x'(t) &= \sum_{j=0}^{n-1} a_{1j} x(t - \tau_j), \\ \vdots & \quad \quad \quad \vdots \\ x^n(t) &= \sum_{j=0}^{n-1} a_{nj} x(t - \tau_j). \end{aligned} \quad (3)$$

Коэффициенты определяются формулой

$$a_{ij} = \left. \frac{d^i R}{d\tau^i} \right|_{\tau_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 0, 1, \dots, n-1. \quad (4)$$

Решая систему уравнений (3) относительно $x(t)$, получаем требуемое разложение (1), в котором

$$A_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta}, \dots, A_n = \frac{\Delta_n}{\Delta} (-1)^{n-1},$$

где Δ — определитель матрицы $\|a_{ij}\|$, а $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$ — определители алгебраических дополнений к элементам первого столбца Δ .

Переход от разложения (1) к представлению $x(t)$ последовательностью чисел вытекает из концепции об информативности моментов обращения в нуль производных функций [2]. Именно в эти моменты производятся выборка данных и кодирование амплитудных и временных параметров сигнала. В результате легко получить экономичный время-импульсный код, в котором моменту обращения в нуль любой производной функции соответствует пачка импульсов стандартной амплитуды и длительности. Число импульсов в пачке кодируется амплитудное значение сигнала в данный момент.

Экономичность кода, как нетрудно заметить, зависит от числа используемых членов разложения (1). Так как реакция биологических систем на производные выше второго порядка не обнаружена [2], в практических целях (например, при автоматической классификации) можно ограничиться двумя членами ряда (1):

$$x(t) = A_1 x'(t) + A_2 x''(t), \quad (5)$$

$$A_1 = \frac{\left. \frac{d^2 R}{d\tau^2} \right|_{\tau_1}}{\left. \frac{d^2 R}{d\tau^2} \right|_{\tau_0} \left. \frac{dR}{d\tau} \right|_{\tau_1}}; \quad A_2 = \frac{1}{\left. \frac{d^2 R}{d\tau^2} \right|_{\tau_0}}$$

и кодировать сигнал в моменты, когда $x'(t) = 0$ и $x''(t) = 0$.

Наиболее сжатое описание получаем, если функция $x(t)$ задана экстремальными точками t_i, t_{i+1}, \dots . Из (5) для этого случая находим

$$x''(t_i) = \frac{x(t_i)}{A_2}. \quad (6)$$

Дифференцируя (6), можно получить значения всех производных в точке t_i . Пусть t_i и t_{i+1} — два последовательных экстремума. Аппроксимация в этих точках производится с помощью парабол (разнонаправленных):

$$\begin{aligned}\hat{x}_1(t) &= \frac{x(t_i)}{2A_2} t^2 - \frac{x(t_i)t_i}{A_2} t + \frac{x(t_i)}{2A_2} (2A_2 + t_i^2); \\ \hat{x}_2(t) &= \frac{x(t_{i+1})}{2A_2} t^2 - \frac{x(t_{i+1})t_{i+1}}{A_2} t + \frac{x(t_{i+1})}{2A_2} (2A_2 + t_{i+1}^2).\end{aligned}\quad (7)$$

Совместное решение уравнений (7) дает в зависимости от значений дискриминанта ($D = 0$, $D > 0$, $D < 0$) одну, две или нуль точек пересечения парабол. Неопределенность устраняется введением точек перегиба либо сопряжением парабол. Итак, алгоритм время-импульсного кодирования обратим.

Исследования на ЦВМ показали, что знание только экстремальных значений $x(t)$ и коэффициентов автокорреляционной функции процесса позволяет восстановить случайный сигнал с точностью до 3% [5].

Следует заметить, что в целом ряде практических случаев, прежде всего при автоматической классификации нет необходимости восстанавливать сигнал. Однако обратимость кода является важным свидетельством того, что в нем основная информация о классифицируемой кривой $x(t)$ не утрачена.

Алгоритм нормирования

Полученный время-импульсный код легко поддается нормированию. Биологический метод нормирования подобного кода прослеживается при анализе работы нейромоторных единиц крыльев бабочки [6]. Р. Виман показал, что при постоянстве временных соотношений между импульсами, подводимыми к мышцам от мотонейронов, достигается инвариантность по отношению к характеру движения крыльев. Эти данные использованы при построении алгоритма нормирования [7].

Пусть $\langle b_1, b_2, \dots, b_k \rangle$ — код, полученный по описанному выше методу. В этом случае k — число информативных моментов (компонент) функции $x(t)$; b_i — вес компоненты ($i = 1, 2, \dots, k$). Если в коде учтены и временные, и амплитудные характеристики кривой $x(t)$, то $b_i = [t_i, x(t_i)]$, где t_i — момент выборки данных. Временное нормирование производится путем последовательного соотношения временных интервалов

$$g_i = \frac{t_i}{t_{i+1}}. \quad (8)$$

Аналогичным образом нормируются амплитудные значения

$$h_i = \frac{x(t_i)}{x(t_{i+1})}. \quad (8a)$$

Нетрудно убедиться, что после такого нормирования функциям $x(t)$, $\lambda x(t)$, $x(\mu t)$ и $\lambda x(\mu t)$ соответствует один и тот же вектор признаков C , т. е. кодовое описание является инвариантным по отношению к амплитудным и временным преобразованиям функции.

В реальном масштабе времени моменты $\{t_i\}$ при необходимости восстанавливаются приведением к общему знаменателю числовых значений $\{g_i\}$. При этом $\{t_i\}$ определяются как числители соответствующих дробей. Если код дополнить рядом, содержащим $x(t_0)$, то восстановление кривой в амплитудном масштабе производится по правилу

$$x(t_i) = x(t_0) \prod_1^i h_k. \quad (9)$$

Получение эталонов. Классификация

При разделении на классы функций времени принадлежность каждой из них к тому или иному классу определяется обычно путем сравнения полученного вектора признаков C_j с эталонным $C_{эт}$. Количество эталонов равно числу классов, на которые необходимо разделить все предъявленные автомату функции $x_1(t), \dots, x_j(t), \dots$.

Эталонный код $C_{m\text{эт}} = \langle c_{m1}, c_{m2}, \dots, c_{mn} \rangle$, где m — порядковый номер эталона, содержит основные признаки своего, m -го класса. Если эти признаки заданы оператором априорно на основании некоторого критерия, то автоматическое распознавание будет производиться в соответствии с этим критерием.

В случае, когда выбор наиболее существенных признаков для кода $C_{m\text{эт}}$ автомат производит самостоятельно, без вмешательства оператора, имеет место самообучение. Роль оператора при этом сводится к предъявлению автомату тестов, которые последний в процессе самообучения должен «научиться» правильно классифицировать, и контролю на этом этапе за правильностью разбиения на образы (классы). Контроль обычно включает в себя «поощрение» или «наказание» устройства (путем изменения по определенному правилу электрических характеристик в его схеме) в зависимости от верности решения. Нахождение основных признаков автоматом представляется наибольший интерес.

Для того чтобы дискретное описание сигнала, полученное после время-импульсного кодирования, близко соответствовало эталонному, необходимо кодировать лишь наиболее существенную информацию. Несущественные изменения функции $x(t)$ приводят к избыточности кода и могут рассматриваться как помеха, параметры которой близки к параметрам исследуемого сигнала.

Первым средством повышения помехозащитности кода является предварительное квантование сигнала $x(t)$ с равномерным

шагом ($\Delta t = \text{const}$). При этом необходимо выполнение условия

$$\Delta t > \frac{1}{f_{\text{пом}}}, \quad (10)$$

где $f_{\text{пом}}$ — частота помехи.

Наряду с этим необходимо задание критерия для кодирования амплитудных значений $x(t)$. Эффективную фильтрацию высокочастотных составляющих сигнала обеспечивает совместно с (10) условие: значение $x(t_i)$ информативно ($x(t_i) \in C_k$), если

$$\left| \frac{x(t_i)}{x(t_i + \Delta t)} \right| \neq 1 \pm \epsilon. \quad (11)$$

Здесь t_i — момент выборки данных при равномерном или время-импульсном квантовании (в последнем случае фильтруется не входной сигнал, а полученный код); ϵ — заданная абсолютная погрешность.

Степень фильтрации помехи зависит от выбора величины ϵ . Улучшения фильтрации можно достичь некоторым усложнением критерия (11). Так, при наличии предварительной равномерной дискретизации действенным является критерий

$$x(t_i) \in C_k \text{ при } \left| \frac{x(t_i)}{x(t_i + \Delta t)} \right| \neq 1 \pm \epsilon \neq \left| \frac{x(t_i)}{x(t_i + 2\Delta t)} \right|. \quad (12)$$

Выполнение условия (12) эквивалентно увеличению шага квантования Δt в два раза при сохранении чувствительности к информативным компонентам.

Если вся предварительная обработка сигнала и определение информативных компонент выполняются аналоговым способом, то фильтрацию легко осуществить повышением порога срабатывания индикаторов нулевого потенциала (например, триггеров Шмитта).

Рассмотрим действительность описываемого метода классификации на конкретных примерах.

Классификация речевых сигналов

Представленные на рис. 2 осциллограммы слова «шесть» получены от различных дикторов [8] с помощью распространенного в технике анализа речевых сигналов ρ -метра. Это устройство обеспечивает нормирование сигналов по амплитуде, однако остаются не решенными проблемы достижения инвариантности по отношению к длительности, и, естественно, кодирования.

Выделение характерных признаков указанных осциллограмм производилось автоматически на ЦВМ по следующей программе.

1. Задается ряд фиксированных значений $\epsilon_1, \dots, \epsilon_a$, причем $\epsilon_1 < \epsilon_2 < \dots < \epsilon_a$.

2. Выбирается значение ϵ_1 .

3. Каждый код подвергается сжатию по правилу (11), т. е. производится операция, сходная с устранением помехи.

4. Определяется разрядность кода.

5. Производится сравнение длин (разрядов) кодов. Если число разрядов (у тестовых кривых оно равно количеству характерных временных признаков) во всех кодах не совпадало, автомат переходил к повторному циклу операций при очередном значении ϵ_i . Перебор значений ϵ_i продолжался до тех пор, пока длина у всех кодов не оказывалась одинаковой.

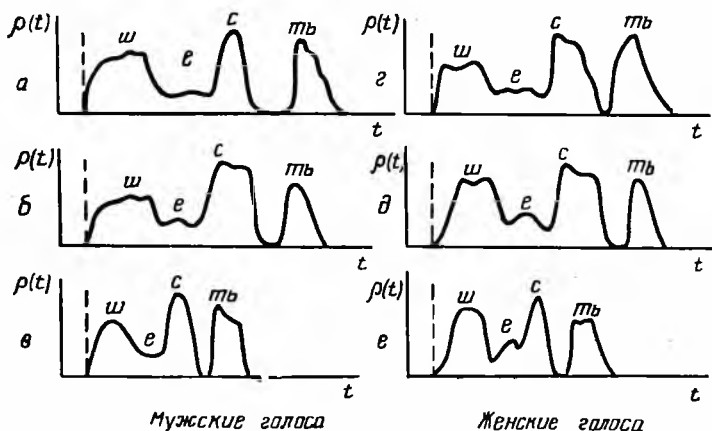


Рис. 2. Осциллограммы слова «шесть».

6. По достижении одинаковой разрядности фиксируется величина ϵ_a и производится поразрядное сравнение кодов. Если они не содержат помехи и действительно принадлежат к одному классу, то веса соответствующих разрядов у сравниваемых кодов будут близки по значению.

7. Определяются веса эталонного кода $\langle g_{1 \text{ эт}}, \dots, g_{n \text{ эт}} \rangle$. Это достигается поразрядным усреднением весов тестовых кодов

$$g_{n \text{ эт}} = \frac{\sum_{i=1}^k g_{im}}{k}, \quad (13)$$

где k — число тестов, m — число разрядов в коде ($m = 1, \dots, n$).

В результате обработки на ЦВМ по данной программе кривых, показанных на рис. 2, были получены коды, которые составили таблицу. Согласно (13), для рассмотренного случая значения весов эталонного кода следующие: $g_{1 \text{ эт}} = 0,163$; $g_{2 \text{ эт}} = 0,317$; $g_{3 \text{ эт}} = 0,574$; $g_{4 \text{ эт}} = 0,730$.

Очередной операцией является нахождение величины погрешности Δ , в пределах которой исследуемый код считается принадлежащим к данному эталону, т. е. относится к соответствующему классу. Так, при классификации набора слов, например «один»,

..., «десять», к классу «шесть» будет отнесен речевой сигнал, код которого имеет одинаковое с эталоном этого слова число разрядов n , а расхождения в весах при поразрядном сравнении не превышают Δ . Следует отметить, что разделение на классы обеспечивается иногда только сравнением длин кодов.

Числовые значения кода

$p(t)$ на рис. 2	Разряд			
	первый	второй	третий	четвертый
<i>a</i>	0,171	0,366	0,602	0,707
<i>б</i>	0,167	0,300	0,542	0,742
<i>в</i>	0,171	0,329	0,561	0,695
<i>г</i>	0,173	0,273	0,504	0,702
<i>д</i>	0,132	0,333	0,579	0,781
<i>е</i>	0,166	0,300	0,654	0,755

Понятно, что в общем случае, когда сигнал по амплитуде не нормирован, приходится оперировать с двумерным, амплитудно-временным, кодом. Наряду с этим существует большая категория сигналов (в первую очередь, гармонические и квазигармонические), для классификации которых требуется код, отражающий главным образом их амплитудные особенности.

Анализ переходных функций

Определение и автоматический контроль параметров системы часто основываются на анализе ее переходной функции, которая, как известно, отражает процесс изменения состояния системы вследствие воздействия стимула. Покажем на простом примере, что описываемый метод кодирования импульсных переходных функций в сжатом виде содержит информацию, достаточную для предварительного технического диагностирования.

Проанализируем распространенный случай, когда система описывается линейным дифференциальным уравнением второго порядка

$$x''(t) + a_1 x'(t) + a_0 x(t) = \begin{cases} u & \text{при } 0 \leq t \leq \tau, \\ 0 & \text{при } t > \tau. \end{cases} \quad (14)$$

Пусть корни характеристического уравнения есть $r_{1,2} = \alpha \pm \beta$, где $\alpha < 0$. Полагая τ достаточно малым, будем рассматривать решение уравнения (14) после окончания действия стимула.

Переносим начало координат в точку $t = \tau$, получаем

$$x(t) = e^{\alpha t} (C_1 \cos \beta t + C_2 \sin \beta t), \quad (15)$$

где C_1, C_2 — константы, определяемые из условия непрерывности решения уравнения в момент окончания действия стимула.

Определим экстремумы переходного процесса. Дифференцируя (15), находим

$$x'(t) = \cos \beta t \cdot e^{at} (C_1 \alpha + C_2 \beta) + \sin \beta t \cdot e^{at} (C_2 \alpha - C_1 \beta). \quad (16)$$

Отсюда для экстремумов имеем

$$t_k = \frac{\varphi + (i-1)\pi}{\beta},$$

где

$$i = 1, 2, \dots, n; \varphi = \arctg \frac{C_1 \alpha + C_2 \beta}{C_1 \beta - C_2 \alpha}. \quad (17)$$

Для переходного процесса без действия случайной помехи расстояние между последовательными экстремумами Δt_i не изменяется и составляет

$$\Delta t_i = \frac{\pi}{\beta}. \quad (18)$$

При разделении на классы основную роль здесь будут играть длина кода, определяемая числом экстремумов, и их амплитудные значения. Рассматривая решение (16) в экстремальных точках, находим, что отношение между двумя последовательными экстремумами следующее:

$$h_i = -e^{\pi\alpha/\beta}. \quad (19)$$

Из рассмотрения (18), (19) следует, что во время-импульсном коде отражены и могут быть найдены основные параметры системы α и β .

Аналитически можно показать, что то же справедливо и для систем более высоких порядков. Теоретически при кодировании переходных функций системы n -го порядка необходимо использовать $(n-1)$ членов ряда (1). Однако на практике для составления эталонных кодов, очевидно, достаточно использования не более двух членов ряда (1).

Классификация статических образов

При наличии устройства, преобразующего изображение в электрические сигналы, время-импульсный метод может быть применен и для классификации статических образов. Такая возможность исследовалась с помощью модели сетчатки глаза [9].

Имитацию развертки во времени статического образа осуществляет матрица рецепторных элементов, веса которых организованы по правилу

$$a_{ij} = a_{11} + \alpha(i-1) + \beta(j-1), \quad (20)$$

где i — номер строки ($i = 1, 2, \dots, n$);

j — номер столбца ($j = 1, \dots, n$);

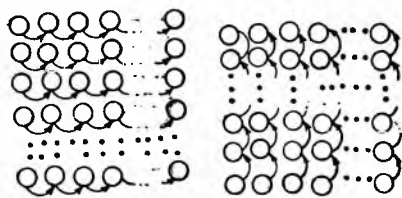
α, β — соответственно приращения весов элементов по вертикали и горизонтали, причем

$$\alpha > \beta \neq a_{11}. \quad (21)$$

Модель, помимо матрицы светочувствительных элементов, включает в себя четыре слоя однотипных элементов, выделяющих существенные признаки, для чего использованы некоторые особенности структурной организации нервных сетей.

Межэлементные связи осуществляются по принципу латерального торможения (рис. 3). В результате веса элементов, возбужденных в направлении по горизонтали, приобретают значения

$$b_{ij} = a_{i, j+1} - a_{ij}. \quad (22)$$



a

b

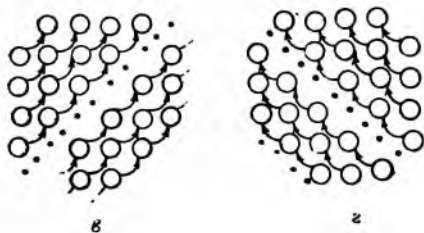
В направлении по вертикали результирующие веса определяются выражением

$$c_{ij} = b_{i+1, j} - b_{ij}, \quad (23)$$

а в диагональных направлениях —

$$d_{ij} = c_{i+1, j+1} - c_{ij}; \quad (24)$$

$$e_{ij} = d_{i+1, j-1} - d_{ij}. \quad (25)$$



v

z

Рис. 3. Слой выделения первичных признаков изображения. Организация элементов слоя для выделения:

a — горизонталей; *b* — вертикалей;
v — наклонов вправо; *z* — наклонов влево.

Проецируемое на матрицу изображение вызывает образование в ней цепочки возбужденных элементов, веса которых имеют значения α , β , γ , δ . Последовательность элементов, с весом α кодирует вертикальный отрезок изображения, β — горизонтальный, γ и δ — наклоны соответственно влево и вправо.

С учетом условия (21) получаем $\gamma = \alpha + \beta$, $\delta = \alpha - \beta$. Вес возбужденного элемента в начальных и конечных точках, а также в точках перегиба изображения составляет $k_i \neq \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq \delta$. Число таких точек определяет разрядность кода, количество возбужденных элементов между ними — веса разрядов. Нормирование и разделение на классы аналогичны приведенному выше описанию.

Примером организации матрицы может служить рис. 4. Осуществляемое ею кодирование изображений показано на рис. 5 (*a*, *b* — проекция изображения на рецепторную матрицу; *v*, *z* — результат обработки изображения в слое для выделения горизонталей; *d*, *e* — выделение вертикалей; *ж*, *з* — выделение линий, наклоненных вправо; *и* — результат обработки изображения в последнем слое «сетчатки»).

37	38	39	40	41	42	43	44	45	46
34	35	36	37	3	39	40	41	42	43
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19

Рис. 4.

Матрица рецепторных элементов с весовыми коэффициентами.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Steinbuch R.* Menschen oder Automatch in Weltraum? — «Naturwissenschaft. Rundschau», 1963, Bd 16, H9, S. 87 — 99.
2. *Цепков Г. В.* Влияние формы сигнала на возбудимость нервной ткани. — В сб.: Кибернетика и вычислительная техника. Вып. 14. Киев, «Наукова думка», 1972, с. 61 — 73.
3. *Пономарева И. Д., Цепков Г. В.* К вопросу о кодировании информации нервной тканью. — В кн.: Управление и информационные процессы в живой природе. М., «Наука», 1971, с. 43 — 50.
4. *Хинин А. Л.* Теория корреляции стационарных стохастических процессов. — «Успехи мат. наук», 1938, вып. 5, с. 58 — 70.
5. *Пономарева И. Д., Цепков Г. В., Пилипенко Ю. Г.* Метод дискретизации электрограмм, основанный на разложении во временной ряд. — В кн.: Нейробионика. Киев, 1970, с. 37 — 45. (Институт кибернетики АН УССР).
6. *Wyman R. J.* Multistable firing patterns among several neurons. — «J. Neurophysiol.», 1966, vol. 29, N 5, p. 187 — 211.
7. *Цепков Г. В.* Об одном алгоритме кодирования электрических сигналов. — В кн.: Конференция по теории автоматов и искусственному мышлению. (Материалы). М., 1968, с. 71 — 77. (Вычислительный центр АН СССР).
8. *Петров О. А.* Статистическая обработка первичных признаков речевых сигналов с использованием ЭВМ. — В кн.: Опознавание образов. Теория передачи информации. М., «Наука», 1965, с. 145 — 154.
9. *Долятовский В. А., Пономарева И. Д., Цепков Г. В.* Многослойная сеть с латеральными связями для выделения признаков и опознавания зрительных образов. — В сб.: Моделирование в биологии и медицине. Вып. III. Киев, «Наукова думка», 1968, с. 35 — 41.

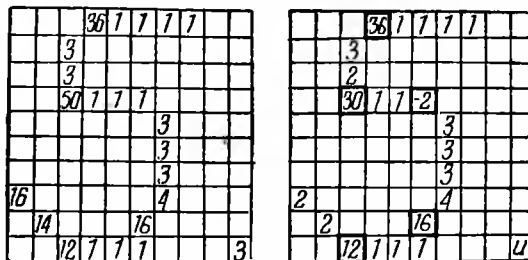
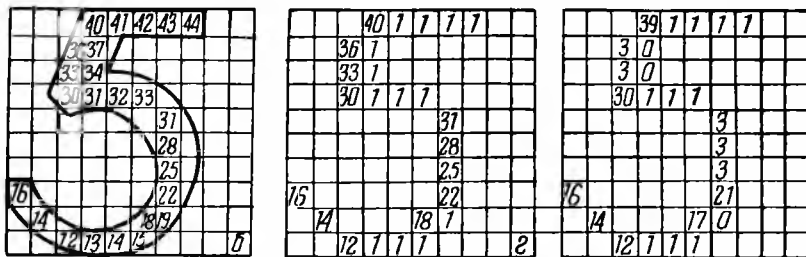
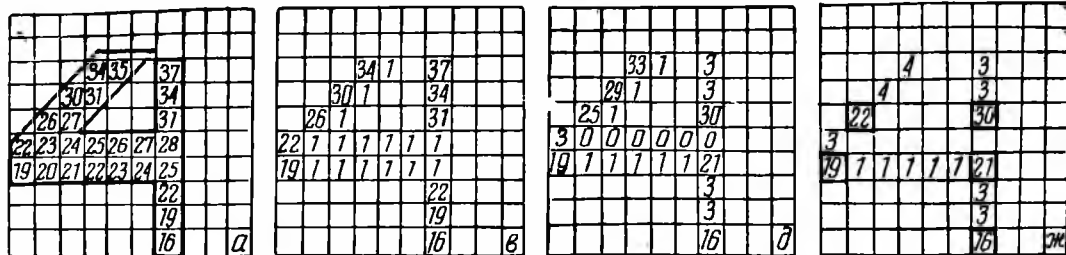


Рис. 5. Послойная обработка изображений в модели сетчатки глаза.

ОБ ОДНОМ АЛГОРИТМЕ СИНТЕЗА ЧИСЛИТЕЛЬНЫХ РУССКОГО ЯЗЫКА

Рассмотрим укрупненную блок-схему алгоритма, который моделирует работу человеческого мозга при синтезе количественных и порядковых числительных русского языка. На вход алгоритма поступают произвольные цифровые последовательности с соответствующими окончаниями любого падежа, которые могут указывать на количественные либо порядковые числительные. В качестве частного случая возможно нулевое окончание у цифровой последовательности на входе, которая в дальнейшем будет именоваться входной. В этом случае алгоритм выдает соответствующее количественное числительное в именительном падеже. На выходе алгоритм вырабатывает количественное или порядковое числительное, соответствующее входной последовательности и стоящее в падеже, которого требует ее буквенное окончание. Например, входной последовательности *243-х* алгоритм поставит в соответствие выходную последовательность *двадцать сорока трех*.

В работе [1] предложены частные алгоритмы синтеза количественных числительных русского языка в именительном падеже, закодированных на специальном языке-посреднике. Алгоритм, предлагаемый в настоящем сообщении, синтезирует количественные и порядковые числительные в произвольном падеже.

Алгоритм [1] может синтезировать сложные числительные, состоящие не более чем из двух основ (восемьсот, шестьдесят и т. д.). Описываемый нами алгоритм в случае необходимости может синтезировать сложные числительные, состоящие более чем из двух основ (шестисотсемидесятипяти тысяч, двадцатидвухмиллионный и т. д.).

Алгоритм [1] может синтезировать названия чисел от 1 до 999 999, т. е. работает хотя и на очень большом, но все же ограниченном множестве входных сигналов. Предлагаемый в данной работе алгоритм может синтезировать числительные, соответствующие как угодно большим числам, для которых существуют названия в русском языке, т. е. работает на неограниченном множестве входных сигналов.

Построение алгоритма синтеза числительных сводится к пяти основным этапам:

1) изучение закономерностей сочетаемости составных элементов числительных;

2) определение достаточного набора формальных признаков для синтеза количественных и порядковых числительных;

3) выявление основных этапов синтеза числительных и разработка подробного алгоритма;

4) психологический эксперимент в целях проверки соответствия результатов работы алгоритма данным носителя русского языка;

5) написание программы и проверка на ЭВМ модели синтеза числительных.

Необходимая для работы описываемого алгоритма постоянная информация (составные элементы числительных и их формальные признаки) включена в две таблицы. В первой приводятся основы количественных числительных и варианты этих основ (*один, одн, восемь, восьм* и т. д.), а также специфические основы порядковых числительных (*перв, втор* и т. д.). Каждой основе в этой таблице приписана следующая информация:

а) типы склонений количественных и порядковых числительных, с окончаниями которых сочетается данная основа;

б) стоящие в постпозиции в составе сложного числительного основы, с которыми сочетается данная основа;

в) значащая цифра цифрового эквивалента данной основы;

г) число нулей, которое следует приписать справа к значащей цифре, чтобы получить цифровой эквивалент данной основы.

Во второй таблице помещены окончания количественных и порядковых числительных, сгруппированные по типам склонений. По номеру строки в этой таблице можно установить, принадлежит ли данное окончание количественному или порядковому числительному, а по номеру графы — падежу окончания.

Алгоритм обрабатывает входную последовательность справа налево, разбивая ее в процессе работы на группы по три цифры — триады. Опишем укрупненную блок-схему, которая указывает на основные этапы работы алгоритма при синтезе числительных.

Блок 1. Выбор из первой таблицы основы числительного (или двух основ), соответствующей очередной анализируемой цифре входной последовательности. Переход к блоку 2.

Блок 2. Проверка: определен ли уже падеж синтезируемого числительного. Если «да», то переход к блоку 6, «нет» — к блоку 3.

Блок 3. Сравнение буквенного окончания входной последовательности с окончаниями во второй таблице тех типов склонения, которые указаны в первой таблице для основы, взятой в блоке 1. Переход к блоку 4.

Блок 4. Выбор из второй таблицы окончания (или двух окончаний), соответствующего падежу синтезируемого числительного. Формирование и запись очередного слова, входящего в состав синтезируемого числительного и соответствующего анализируемой цифре входной последовательности. Переход к блоку 5.

Блок 5. Проверка: все ли цифры входной последовательности проанализированы. Если «да», то переход к блоку 8, «нет» — к блоку 1.

Блок 6. Проверка: является ли последняя основа, полученная в результате работы блока 1, основой *тысяч, миллион, миллиард* и т. д. Если «да», то перейти к блоку 7, «нет» — к блоку 4.

Блок 7. Выбор из второй таблицы окончания, соответствующего последней взятой из первой таблицы основе. Число и падеж окончания зависят не только от падежа всего синтезируемого числительного, но и от цифры, которая стоит первой справа в анализируемой триаде. Формирование и запись очередного слова, входящего в состав синтезируемого числительного. Переход к блоку 5.

Блок 8. Замена порядка следования слов, входящих в состав синтезируемого числительного, на противоположный (это делается потому, что цифры входной последовательности анализируются справа налево).

Конец работы алгоритма.

Поясним содержание работы некоторых блоков. В блоке 1 анализируемой цифре входной последовательности ставится в соответствие только одна основа, если в первой таблице имеется основа, у которой в информации в пункте в) стоит число, равное анализируемой цифре входной последовательности, а в пункте г) записано число, на единицу меньшее порядкового номера анализируемой цифры в триаде (при отсчете справа налево). Если информация в г) не соответствует номеру анализируемой цифры, то берется одна из основ, записанная в пункте б), у которой количество нулей цифрового эквивалента на единицу меньше номера анализируемой цифры в триаде. В этом случае анализируемой цифре ставятся в соответствие две основы. Основы *тысяч, миллион, миллиард* и т. д. выбираются перед началом анализа очередной триады.

В блоке 2 ответ «нет» вырабатывается только при обработке первой значащей (отличной от нуля) цифры входной последовательности, если на входе имеется буквенное окончание. В остальных случаях падеж всего синтезируемого числительного и каждого отдельного слова, входящего в его состав, считается известным.

Если в блоке 1 взята одна основа, то в блоке 4 выбирается одно необходимое окончание из тех типов склонения, которые записаны в информации к основе в пункте а). Если в блоке 1 взято две основы, то выбираются два соответствующих этим основам окончания. При формировании очередного выходного слова учитывается то обстоятельство, что, как правило, одной значащей (отличной от нуля) цифре входной последовательности соответствует одно слово, входящее в состав выходного числительного. Исключение составляют случаи, когда на выходе синтезируется слово с основой *надцат*, а также заканчивающееся на *-тысячный, -миллионный* и т. д. [2].

Число и падеж слов с основами *тысяч, миллион, миллиард* и т. п. зависят не только от падежа синтезируемого числитель-

ного, но и от первой справа цифры в триаде. На это указывают следующие примеры: 1000 — одна тысяча; 2000 — две тысячи; 5000 — пять тысяч; 1000-е — одной тысяче; 2000-м — двум тысячам; 5000-м — пяти тысячам. Подобная зависимость учитывается при работе блока 7.

Описанная блок-схема была положена в основу подробного алгоритма, реализованного на ЭВМ «Минск-32». Созданная модель синтеза количественных и порядковых числительных русского языка может представлять самостоятельный интерес как математическое описание одной из психических функций мозга человека, а также найти применение при автоматическом переводе, в автоматизированных справочно-информационных системах и в ряде других случаев.

ЛИТЕРАТУРА

1. Доклады на конференции по обработке информации, машинному переводу и автоматическому чтению текста. Вып. 3. М., Изд-во АН СССР, 1961. 12 с.
2. Розенталь Д. Э. Русский язык. Пособие для поступающих в вузы. М., Изд-во Моск. ун-та, 1965. 240 с.
3. Грамматика русского языка. Т. 1. М., Изд-во АН СССР, 1960. 719 с.

УДК 62.506.2

А. Е. БОЖКО, В. А. НИКИТИН, К. В. ГРИГОРЬЕВА

К ОПТИМАЛЬНОМУ ПЛАНИРОВАНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПРИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

В процессе биологических исследований для получения наиболее достоверных результатов при минимуме экспериментов приходится обращаться к теории оптимального планирования, позволяющей избежать лишних опытов и непроизводительной траты сил и времени.

Наиболее целесообразно последовательное планирование небольших серий экспериментов, результаты которых постепенно приближаются к области оптимума. Характеристикой (оценкой) искомой точности служат доверительные интервал Δ и вероятность P . Известно, что в биологических исследованиях вполне допустимые значения P составляют 0,90—0,95, а Δ оценивается в 5—10% выборочной средней M^* .

Результаты эксперимента могут быть оценены с помощью формул теории малых выборок:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n}; \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - M)^2}{n-1}}; \quad m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}; \quad t = \frac{\Delta}{m}. \quad (1)$$

* Рафалес-Ламаргека Э. Э., Николаев В. Г. Некоторые методы планирования и математического анализа биологических экспериментов. Киев, «Наукова думка». 1971. 150 с.

Здесь T_i — результат измерения исследуемого параметра;
 M — математическое ожидание параметра T ;
 σ — среднеквадратичное отклонение в результатах измерения параметра T ;
 m — параметр таблиц Стьюдента—Фишера (см. ссылку);
 t — критерий достоверности результатов измерения;
 n — число опытов.

Методика пользования формулами (1) в целях минимизации числа опытов основывается на последовательном проведении последних и параллельном накоплении результатов измерения и обработки до тех пор, пока не достигнет заданного критерия (0,9—0,95). Значения доверительной вероятности P определяются из графиков, соответствующих таблицам Стьюдента—Фишера.

Несмотря на рациональную процедуру проведения опытов, одновременно с вычислениями экспериментатору приходится осуществлять значительное количество последних, чтобы убедиться в окончании эксперимента.

Рассмотрим опыт, проведенный нами при действии сверхнизких температур на ткани слизистой оболочки полости рта животных. Задача эксперимента — исследовать процессы в тканях, подвергшихся такому воздействию, для разработки метода лечения предраковых кожных заболеваний.

Результаты эксперимента и вычислений по формулам (1) приведены в таблице. Из нее видно, что для убеждения в окончании эксперимента (после 8—10 опытов) необходимо провести большое количество вычислений. Избежать этого можно путем выведения ориентировочной формулы для определения того числа опытов, которое удовлетворяет заданным доверительной вероятности $P = 0,9—0,99$ и доверительному интервалу $x = 0,05 \pm 0,1$.

С этой целью на графике рис. 1 (см. ссылку) необходимо определить критерий достоверности t_i , соответствующей области изменения доверительной вероятности P , т. е.

$$\frac{\Delta}{m_i} = \frac{x M_i}{m_i} \geq t_i, \quad (2)$$

где i — номер опыта.

Из формулы (1) определяется параметр

$$m_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^n T_i^2}{n} - \bar{M}_i^2 \right)}. \quad (3)$$

Если в выражение (3) подставим (2) и

$$\bar{M}_i = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n},$$

Обработка данных измерений температур в эпителиальном слое слизистой оболочки полости рта подопытных животных при действии низких температур (-196°C)

Номер опыта	$k = n - 1$	$-T_i^{\circ}\text{C}$	T_i^2	ΣT_i^2	$\Sigma T_{i/n}^2$	ΣT_i	M_i	M_i^2	m_i	$\Delta_1 (10\%)$	t_{1i}	P_{1i}	$\Delta_2 (5\%)$	t_{2i}	P_{2i}
1	0	100	10 000	10 000	10 000	100	100	10 000	—	—	—	—	—	—	—
2	1	130	16 900	26 900	13 450	230	115	13 225	16,62	11,5	0,692	0,3	5,75	0,346	0,2
3	2	107	11 449	38 349	12 783	337	112,3	12 611	9,47	11,23	1,19	0,65	5,6	0,6	0,35
4	3	108,5	11 664	50 013	12 503	445	111,25	12 388	8,25	11,125	1,35	0,72	5,5	0,68	0,4
5	4	124	15 776	65 789	13 158	569	113,6	12 905	8,25	11,36	1,38	0,75	5,7	0,69	0,41
6	5	130	16 900	872 689	13 781	699	116,5	13 572	6,5	11,65	1,79	0,85	5,82	0,89	0,6
7	6	100	10 000	92 689	13 241	799	114,1	13 019	6,15	11,41	1,86	0,9	5,7	0,93	0,62
8	7	99	9 801	101 590	12 699	898	112,2	12 587	4,07	11,22	2,76	0,96	5,6	1,38	0,8
9	8	115	12 325	114 815	12 757	1 013	112,6	12 679	3,15	11,26	3,6	0,99	5,63	1,8	0,9
10	9	147	21 609	136 424	13 642	1 160	116	13 456	4,63	11,6	2,5	0,96	5,8	1,25	0,75
11	10	135	18 256	154 680	14 062	1 295	117,7	13 853	4,56	11,77	2,6	0,966	5,9	1,3	0,77
12	11	127	16 109	170 789	14 233	1 422	118,5	14 042	4,15	11,85	2,86	0,972	5,95	1,43	0,82
13	12	140	19 600	190 389	14 645	1 562	120	14 400	4,52	12	2,65	0,968	6	1,325	0,8
14	13	104	10 816	201 205	14 372	1 666	118	14 004	4,56	11,8	2,6	0,969	5,9	1,3	0,79

то получим

$$\frac{x \sum_{i=1}^n T_i}{\sqrt{\frac{1}{n-1} \left[\frac{\sum_{i=1}^n T_i^2}{n} - \left(\frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n} \right)^2 \right]}} \geq t. \quad (4)$$

Из него определяется количество опытов n , результаты которых удовлетворяют заданным P и Δ .

Формула для числа определений n имеет вид

$$n \geq \frac{\left(\sum_{i=1}^n T_i \right)^2 (x^2 - t^2)}{x^2 \left(\sum_{i=1}^n T_i \right)^2 - t^2 \sum_{i=1}^n T_i^2}. \quad (5)$$

Для выражения (5) обязательны следующие значения P и t :

P	0,9	0,95	0,97	0,99	0,995
t	1,9	2,4	2,6	2,8	3,0

Из сопоставления выражения (5) с таблицей видно, что по формуле (3) число вычислений сокращается в 3,5 раза.

Поясним особенности пользования данной формулой при определении минимального количества опытов, соответствующих заданным P и Δ .

Пусть проведено n_1 опытов, в которых измерены величины T_i , $i = 1, 2, \dots, n_1$. По формуле (5) необходимо определить число опытов n , удовлетворяющих заданной точности x с вероятностью P . Если окажется, что $n > n_1$, то эксперимент следует продолжать. При $n < n_1$ последующие опыты не нужны.

Пример 1. Зададимся $x = 0,1$; $P = 0,9$. Воспользуемся результатами (см. таблицу) шести опытов и

$$\sum_{i=1}^6 T_i^2 = 82\,689.$$

Вычислим

$$\left(\sum_{i=1}^6 T_i \right)^2 = 488\,711.$$

По формуле (5) находим $n \geq 6$, т. е. минимальное число опытов должно быть больше шести.

Пример 2. По таблице и результатам опыта 14 необходимо определить достаточное количество опытов, соответствующих $x = 0,05$ и $P = 0,95$. В результате вычисления по (5) находим, что $n > 14$, т. е. эксперимент необходимо продолжать.

Пример 3. Зададимся $x = 0,1$; $P = 0,9$, число опытов $n_1 = 10$. Пользуясь результатами вычислений (таблица) и формулой (5), получаем $n \geq 9$, т. е. число опытов является достаточным.

В расчете количества опытов по формуле (5) включаются вычисления только трех столбцов из таблицы вместо двенадцати, что значительно экономит время. Данная формула пригодна для проведения различных экспериментов, удовлетворяющих измерениям с точностью $x = 0,05 \div 0,1$ и вероятностью $P \geq 0,9$.

Использование методики планирования эксперимента с параллельным вычислением результатов измерения по предлагаемой процедуре позволило осуществить эксперимент на минимальном количестве подопытных животных, что ускорило формирование нового метода лечения предраковых заболеваний тканей.

Таким образом, минимизация числа опытов экспериментируемых объектов в процессе биологических исследований является соответствующим оптимизатором возрастания интенсивности разработки необходимого метода исследования.

УДК 62.506.001

В. А. ГОРБАЧЕВ, А. Д. ТЕВЯШЕВ, Н. В. ФЕДОРОВ

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ПРОМАХОВ В КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Выделение промахов — одно из направлений в теории ошибок. В настоящее время не существует эффективной методики выделения промахов в косвенных измерениях. При обработке результатов измерений промахи могут сильно исказить как значение оценок определяемых величин так и границы доверительной области. Поэтому очень важно устранить промахи из группы измерений.

Рассмотрим ряд измеренных величин θ_i , полученных от угломерных приборов P_i с известными координатами x_i, y_i ($i = 1, \dots, n$) в целях определения координат x_s, y_s объекта s (рис. 1). Такого рода задачи встречаются в навигации, геодезии. Очевидно, что число измеренных величин $n \geq 2$. Если в опыте присутствуют промахи, то обычно рекомендуется отбрасывать измерение, для которого

$$\frac{|\theta_i - \bar{\theta}_i|}{\sigma_i} > 3, \quad (1)$$

где

$$\bar{\theta}_i = \arctg \frac{y_i - \bar{y}}{x_i - \bar{x}}$$

Оценки координат \bar{x}, \bar{y} можно получить с использованием измерения, подозреваемого на промах [1], или без него. В первом случае при малом числе измеренных величин промах не выявится, как бы груб он ни был, во втором возможны лишь интуитивные рекомендации для выделения промахов.

Постановка задачи в терминах теории распознавания образов

Рассмотрим множество точек T_{ij} ($i, j = 1, \dots, n; i \neq j$), образованных пересечением направлений i -го и j -го угломерных приборов (рис. 1), и отметим свойства этих точек, которые могли бы характеризовать направления (измеренные величины θ_i) как «точные» или «промахи». Два из последних трех слов заключены в кавычки, так как обозначают относительные понятия и говорить о точных и неточных измерениях можно лишь в сравнении с остальными измеренными величинами из данного опыта.

Точки, которые образованы более точными направлениями и для которых значения φ_{ij} близки к $\frac{1}{2}\pi$ [2], должны группироваться вокруг искомого объекта S , т. е. их совокупность должна обладать свойством «компактности». Множество таких точек обозначим M_s , остальные точки — M_s^c , определив этим алфавит образов.

Следовательно, первый и самый трудный этап решения задачи выделения «промахов» состоит в определении подмножеств M_s , M_s^c как образов. Множеством объектов являются точки T_{ij} ,

пространством признаков — координаты этих точек. В такой интерпретации данную задачу в известной степени можно отнести к задачам «таксономии», которые в [3] определяются следующим образом: «...множество реализаций, т. е. векторов пространства X , с помощью решающих функций D (т. е. по определенному критерию «близости», «связности») нужно разделить на такое количество и таких элементов алфавита S , чтобы при подобной перекодировке затраты не превышали бы заданной величины N_0'' ».

На втором этапе решения задачи все измеренные величины необходимо разделить на два класса: 1) класс «точных» величин; 2) класс «промахов».

Для каждого наблюдателя P_i будем определять значение некоторой величины λ_i такой, что

$$\lambda_i = \begin{cases} 1, & \text{если хотя бы одна из точек } T_{ij} \in M_s \quad (j = 1, \dots, n; i \neq j). \\ 0, & \text{если все точки } T_{ij} \in M_s^c \quad (j = 1, \dots, n; i \neq j). \end{cases}$$

Измеренную величину θ_i будем относить в класс «точных», если $\lambda_i = 1$, и в класс «промахов», если $\lambda_i = 0$. Легко показать, что решение этой задачи можно также рассматривать с позиций теории распознавания образов. Действительно, мы определили

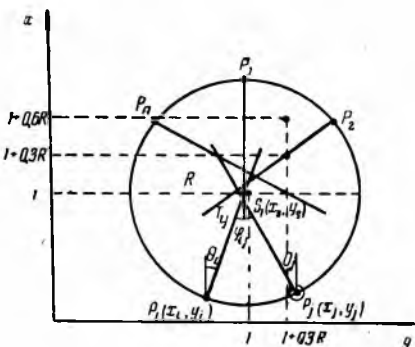


Рис. 1. Система угломерных приборов для определения местоположения объектов.

алфавит образов из двух элементов, пространство признаков размерность которого равна единице, (λ) , решающую функцию $F(\lambda) = \lambda$, представляющую собой пороговый элемент.

Простота реализации второго этапа не вызывает затруднений. Поэтому остановимся подробнее на первом этапе решения задачи выделения «промахов».

Определение вида решающей функции

Принятая гипотеза «компактности» характеризует структуру таксонов (группировок отдельных реализаций). Поэтому будем считать, что чем «компактнее» подмножества элементов T_{ij} , выделенных в отдельные таксоны, тем выше качество таксономии F .

Аналогично [4] в настоящей работе была предпринята попытка определить параметры критерия качества (решающей функции) таксономии, выполненной человеком. С этой целью группе «экспертов» предъявлялись картинки с различными вариантами реализаций геодезических данных и из этих точек предлагалось выделить два таксона $M_s, M_{\bar{s}}$. В процессе экспериментов было выяснено следующее.

1. С учетом свойства «компактности» таксона M_s «эксперты» за форму его района принимали круг радиусом R .

2. Топологические свойства системы угломерных приборов «эксперты» учитывали при назначении веса отдельной точки T_{ij} . Вес назначался тем большим, чем ближе к $\frac{1}{2}\pi$ приближался угол φ_{ij} .

Прежде чем приступить к определению вида решающей функции, рассмотрим способ оценки параметров, влияющих на качество таксономии.

Определение веса точки T_{ij} . Введем обозначение V_{ij} — вес точки T_{ij} . Значение веса точки удобно определять как

$$V_{ij} = \sin \varphi_{ij}. \quad (2)$$

Функциональная зависимость (2) была выбрана из следующих соображений.

1. Точка должна принимать максимальный вес при $\varphi_{ij} = \frac{1}{2}\pi$.

2. Надежными считаются те направления, для которых $\frac{1}{6}\pi \leq \varphi_{ij} \leq \frac{5}{6}\pi$, т. е. вес точки при изменении угла встречи в этом интервале должен изменяться медленно. При сравнении значения функции на интервалах

$$\left[\frac{1}{6}\pi, \frac{5}{6}\pi\right] \text{ и } \left[0, \frac{1}{6}\pi\right], \left[\frac{5}{6}\pi, \pi\right]$$

можно отметить, что на первом интервале скорость изменения в два раза меньше, чем на двух других.

Определение радиуса круга. Уточним понятие радиуса в соответствии с п. 1. Радиусом круга назовем радиус наименьшего круга, содержащего все точки выделенного таксона M_s . Будем также считать, что границы круга принадлежат кругу, т. е. круг замкнут.

Система угломерных приборов будет минимально избыточной при $n = 3$. В этом случае количество точек пересечения k , вычисленное по формуле

$$k = \frac{n(n-1)}{2},$$

равно трем, поэтому в множестве M_s не должно быть меньше трех точек.

Наименьшим кругом, содержащим три точки, является:

1) круг описанной окружности, если данные три точки образуют остроугольный треугольник;

2) круг с центром в середине наибольшей стороны и радиусом, равным половине этой стороны, если точки образуют тупоугольный треугольник.

Эти утверждения очевидны, поэтому доказывать их не нужно. Таким образом, всегда можно определить радиус множества, состоящего из трех точек.

Теорема. *Наименьшим кругом, содержащим данные k точек, является наибольший из множества наименьших кругов для каждой трех точек из данных k точек.*

Доказательство. Пусть на плоскости заданы точки B_i ($i = 1, \dots, k$). Обозначим R — радиус наименьшего круга, содержащего данные k точек; $R_{j,m,l}$ — радиус наименьшего круга, содержащего точки B_j, B_m, B_l ($j, m, l = 1, \dots, k; j \neq m \neq l$); O — центр наименьшего круга, содержащего данные k -точек; $O_{j,m,l}$ — центр наименьшего круга, содержащего точки B_j, B_m, B_l .

Пусть для точек B_1, B_2, B_3

$$R_{1,2,3} = \max_{j,m,l} R_{j,m,l}.$$

Очевидно, что радиус наименьшего круга, содержащего данные k точек, не может быть меньше радиуса наибольшего из множества наименьших кругов для каждой трех точек из данных k , т. е. $R \geq R_{1,2,3}$. Знак равенства соответствует случаю $O \equiv O_{1,2,3}$.

Для доказательства теоремы необходимо показать, что все точки B_i принадлежат наименьшему кругу, содержащему точки B_1, B_2, B_3 .

Из множества точек $\{B_i\}$ ($i = 4, \dots, k$) возьмем произвольную точку B_4 и рассмотрим точки B_1, B_2, B_4 . По условию теоремы $R_{1,2,4} \leq R_{1,2,3}$. Поэтому круги с центрами в точках B_1, B_2, B_4 и радиусом $R_{1,2,3}$ имеют непустое множество общих точек. Аналогичный вывод можно сделать и для кругов радиусом $R_{1,2,3}$ с центрами в точках B_1, B_3, B_4 . В общем случае комбинации кругов по три с центрами в точках B_i и радиу-

сом $R_{1,2,3}$ имеют непустое множество общих точек. Применяя теорему Хэли [5], можно сделать вывод, что существует точка, принадлежащая всем кругам одновременно. Круги с центрами в точках B_1, B_2, B_3 имеют только одну общую точку $O_{1,2,3}$. Следовательно, она принадлежит кругам с центрами в точках B_i ($i = 4, \dots, k$). Но если точка $O_{1,2,3}$ принадлежит кругам радиусом $R_{1,2,3}$ с центром в точках B_i ($i = 4, \dots, k$), то точки B_i ($i = 4, \dots, k$) принадлежат кругу радиусом $R_{1,2,3}$ с центром в точке $O_{1,2,3}$, что и требовалось доказать.

Введем обозначения: M_L — подмножество точек из множества всех точек $\{T_{ij}\}$ ($L = 1, 2, \dots, C_k^3, i, j = 1, \dots, n; i \neq j$); V_{ij}^L — вес точки $T_{ij} \in M_L$; $W_L = \sum V_{ij}$ — вес множества M_L ; R_L — радиус множества M_L .

Возьмем два множества — M_i и M_j . Допустим, что одно из этих множеств необходимо считать множеством M_s . Если $W_i > W_j, R_i < R_j$, то, очевидно, за M_s принимается множество M_i . Таким образом, решающая функция, которую обозначим $F(W, R)$, должна возрастать с увеличением W и уменьшением R , а также достигать своего наибольшего значения, когда все измеренные величины не имеют погрешностей. Пусть максимальное значение $F(W, R)$ равно единице. В этом случае необходимо (необходимость вытекает из (3)) вес множества M_L характеризовать нормированной величиной

$$W_L^* = \frac{W_L}{W_0},$$

где $W_0 = \sum_{i,j} V_{ij}$ — вес всех точек T_{ij} . Перечисленным выше свойствам удовлетворяет функция

$$F(W^*, R) = W^* a^{bR}, \quad (3)$$

где a, b — константы.

Выбор константы «а». Пусть в выражении (3) $a = a_1, b = b_1$. Под a, b будем понимать текущее значение констант «а», «b». Покажем, что для любого $a = a_2 \neq a_1$ всегда можно выбрать такое $b = b_2 \neq b_1$, при котором

$$W^* a_1^{-b_1 R} = W^* a_2^{-b_2 R}. \quad (4)$$

Из (4) следует, что

$$b_2 = b_1 \frac{\ln a_1}{\ln a_2}$$

или

$$a = a_1^{b_1/b_2},$$

т. е. одну из констант можно выбрать произвольно.

Выбор константы «b». Значение параметра b определяет степень влияния радиуса на выбор множества M_s .

Пусть имеются два множества M_i и M_j , для которых справедливо неравенство $F_i > F_j$, т. е.

$$W_i^* a^{-bR_i} > W_j^* a^{-bR_j}$$

или

$$\log_a \frac{W_i^*}{W_j^*} > b(R_i - R_j). \quad (5)$$

Если за множество M_i будет принято множество точек, полученное «экспертом», то неравенство (5) позволяет вычислить границы значений константы « b », при которых выбранное множество можно считать множеством M_s . Границы b определяются тремя случаями:

1. Если $R_i > R_j$, то

$$b < \frac{1}{R_i - R_j} \log_a \frac{W_i^*}{W_j^*}. \quad (6)$$

2. Если $R_i = R_j$, то независимо от значений константы « b » множество M_i может быть выбрано, когда

$$W_i^* > W_j^*. \quad (7)$$

3. Если $R_i < R_j$, то

$$b > \frac{1}{R_i - R_j} \log_a \frac{W_i^*}{W_j^*}. \quad (8)$$

Алгоритм решения задачи

Алгоритм решения задачи может быть получен как следствие доказанной в работе теоремы. Действительно, для определения подмножества M_L , доставляющего максимум $F(W^*, R)$, достаточно про-

смотреть все возможные сочетания по три из множества точек T_{ij} . Варианты решения, получившие большие значения F , необходимо признать наилучшими.

Нетрудно видеть, что при значительном количестве угломерных приборов этот алгоритм становится очень громоздким. Например, при $n = 15$ число переборov $L = 187\,460$, что, естественно, связано с большими затратами машинного времени. Число переборov можно значительно уменьшить, если процедуру поиска подмножества M_L , максимизирующего F , выполнять в два приема.

Если считать верными рассуждения относительно свойств точек множества M_s и для точек на отдельном направлении, то решающую функцию (3) целесообразно применить последовательно к каждому из них. В результате из всех точек T_{ij} ($j = 1, \dots, n$; $i \neq j$) i -го направления будет выбрано некоторое подмножество точек M_{iL} ($L = 1, 2, \dots, C_{n-1}^i$), при котором функция (3) достигнет макси-

мального значения. Радиус множества R_{iL} определяется как половина отрезка, границами которого являются крайние точки множества M_{iL} . Каждому направлению поставим в соответствие середину найденного отрезка и обозначим его через O_i ($i = 1, \dots, n$). Всем этим точкам придадим одинаковый вес (для равноточной системы угломерных приборов) $\frac{1}{n}$.

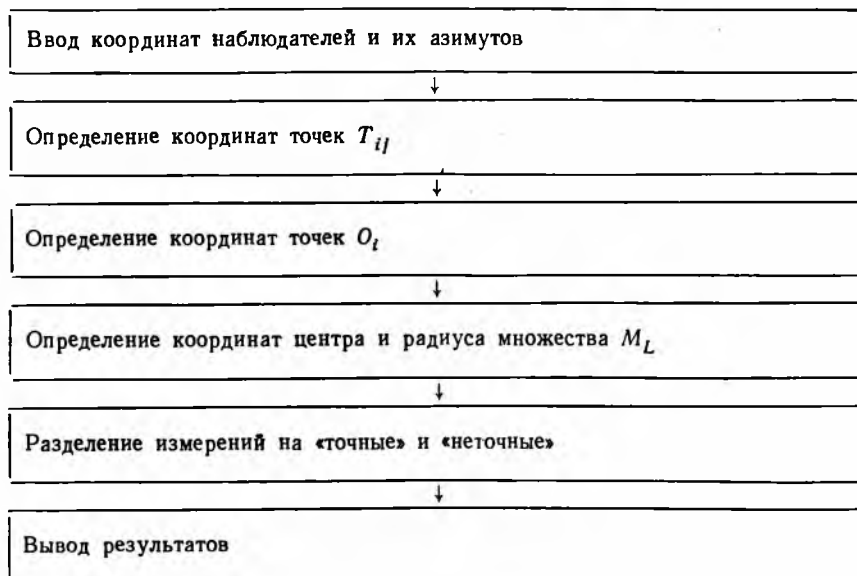


Рис. 2. Блок-схема алгоритма выделения «промахов».

Из взвешенной системы точек O_i , проверяя все сочетания по три, выделим множество точек M_L ($L = 1, 2, \dots, C_n^3$), максимизирующее функцию (3). После этого можно приступить к последнему этапу решения задачи выделения «промахов».

Если точка O_i принадлежит множеству M_L , то соответствующую измеренную величину необходимо считать «точной», в противном случае — «промахом».

Применение модифицированного алгоритма (рис. 2) существенно сокращает число переборov (при $n = 15$, $L = 546$) и дает выигрыш машинного времени в 15—20 раз.

Как отмечалось выше, константа a может быть выбрана произвольно. Пусть $a = e$, тогда

$$F(W^*, R) = W^* \exp(-br). \quad (9)$$

Значение константы « b » было вычислено отдельно для выделения множества M_{iL} и M_L . Как в первом, так и во втором случае была составлена программа, по которой машине задавались

множества, названные «экспертом» в качестве M_{1s} и M_s , и вычислялись границы возможных значений — соответственно « b_1 » и « b_2 ». Для первого случая было обработано 100 вариантов расположения точек на направлениях, во втором — 50 вариантов расположения точек O_i ($i = 1, \dots, n$). В результате проведенного эксперимента были получены следующие значения: $b_1 = 13,6$; $b_2 = 17,4$.

Эффективность алгоритма, реализованного на ЭВМ «М-222», определялась следующим образом.

Задавался район контроля в виде круга радиусом R . Угломерные приборы размещались по кругу на одинаковых расстояниях друг от друга (рис. 1). На точку с известными координатами x_s, y_s вычислялись истинные углы $\theta_{i \text{ ист}}$ ($i = 1, \dots, n$). Опытный угол находился по формуле

$$\theta_i = \theta_{i \text{ ист}} + \Delta_i,$$

где Δ_i — ошибка i -го угломерного прибора, полученная с помощью генератора случайных чисел. Для проведенного эксперимента подсчитывался критерий эффективности алгоритма:

$$G_i = \frac{\bar{\Delta}_i}{\Delta_i} \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i}{\frac{1}{n-m} \left(\sum_i \Delta_i - \sum_j \Delta_j \right)} \quad (i = 1, \dots, \Gamma), \quad (10)$$

где m — число индексов j ; j — индексы угломерных приборов, измерения которых были отнесены к классу «промахов»; Γ — число обработанных экспериментов для одной точки.

В таблице для различных точек района и разным числе угломерных приборов — от четырех до пятнадцати — приведены средние значения \bar{G} по экспериментам.

Исходные координаты искомой точки		Коэффициент эффективности \bar{G} при участии 4—15 наблюдателей и соответственном количестве экспериментов											
		45	36	30	25	22	20	18	16	15	13	12	12
1	1	1,23	1,29	1,29	1,37	1,33	1,30	1,32	1,37	1,37	1,41	1,50	1,37
1+0,3	1	1,16	1,28	1,22	1,38	1,35	1,33	1,38	1,33	1,35	1,39	1,36	1,44
1+0,6	1	1,15	1,32	1,26	1,37	1,41	1,27	1,35	1,33	1,29	1,46	1,38	1,44
1+0,3	1+0,3	1,18	1,27	1,25	1,27	1,35	1,33	1,40	1,34	1,34	1,32	1,42	1,37
1+0,6	1+0,3	1,11	1,29	1,25	1,32	1,33	1,33	1,29	1,36	1,37	1,34	1,34	1,40

Среднее значение по всем точкам

—	—	1,17	1,29	1,26	1,34	1,35	1,31	1,35	1,34	1,34	1,38	1,40	1,40
---	---	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

ВЫВОДЫ

1. Критерий эффективности не зависит от положения искомой точки.
2. Применение предложенного алгоритма уменьшает среднюю погрешность исходной совокупности измерений на 30—40%.

3. Алгоритм может быть использован в общей процедуре обработки геодезических или навигационных данных при назначении апостериорного веса каждому измерению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горбачев В. А., Фвдокимов А. Г., Матейченко В. В. К вопросу о создании алгоритма обработки триангуляционных наблюдений с возможным участием оператора в условиях неполной информации.—В сб.: Проблемы биоиники. Вып. 11. Харьков, Изд-во Харьк. ун-та, 1973, с. 102—111.
2. Кукуес И. С., Старик М. Е. Основы радиопеленгации. М., «Сов. радио», 1966. 640 с.
3. Загоруйко Н. Г. Методы распознавания и их применения. М., «Сов. радио», 1972. 206 с.
4. Елкина В. Н., Загоруйко Н. Г. Количественные критерии качества таксономии и их использование в процессе принятия решений.—В сб.: Вычислительные системы. Вып. 36. Новосибирск, 1969, с. 12—18. (Ин-т математики Сиб. отд. АН СССР).
5. Данцер Л., Грюнбаум Б., Кли В. Теорема Хели. М., «Мир», 1968. 187 с.

УДК 62.506.2

М. Ф. БОНДАРЕНКО, канд. техн. наук, Ю. В. ЛОПУХИН,
А. Ф. ОСЫКА, Н. К. СВИНАРЬ

АЛГОРИТМ ФОРМАЛЬНОГО СПРЯЖЕНИЯ ГЛАГОЛОВ

Цель настоящей работы — построение алгоритмов спряжения глаголов в прошедшем времени. Из грамматики русского языка известно, что в прошедшем времени глагол употребляется в следующих видах числа и рода:

- 1) единственное число мужского рода;
- 2) единственное число женского рода;
- 3) единственное число среднего рода;
- 4) множественное число.

В работе приводится алгоритм получения форм глагола прошедшего времени из инфинитива. Для описания работы алгоритма введем некоторые определения.

Цепочкой назовем любую конечную упорядоченную последовательность элементов множества A , которое в дальнейшем будем называть алфавитом, а его элементы — литерами. Под длиной цепочки будем понимать количество входящих в нее литер.

Разбиением цепочки d будем называть такую цепочку $d' = t|r$, из которой может быть получена цепочка d путем удаления символа границы «|» и пустых интервалов.

Две цепочки будут тождественно равны, если количество литер в них равно и литеры, стоящие на одинаковых местах, совпадают.

Введем операцию *вложения* V цепочки d_1 в цепочку d_2 . Результат такой операции является логическим значением и равен true, если существует разбиение $d_2 = t|d_1$, и false в противном случае. Цепочку t условимся называть остатком (он может быть и пустым). Отношение вложения V обладает следующими свойствами:

1. Рефлексивность dVd (d вкладывается в d).
2. Антисимметричность $V \cap V^{-1} \subseteq E$ (соотношения dVf и fVd выполняются одновременно только тогда, когда $d=f$).
3. Транзитивность $V^2 \subseteq V$ (если dVf и fVg , то выполнено и dVg). Отсюда следует по индукции: если $dVf_1, f_1Vf_2, \dots, f_{n-1}Vg$, то dVg).

Введенные обозначения и определения несколько отличаются от принятых в литературе по прикладной лингвистике, но полностью соответствуют методу анализа, применяемому в алгоритме.

Работа алгоритма состоит из трех этапов:

- 1) получение глагола прошедшего времени единственного числа мужского рода;
- 2) получение глаголов прошедшего времени единственного числа женского и среднего рода и множественного числа;
- 3) грамматическая корректировка полученных глагольных форм.

На каждом этапе на вход подается входная цепочка, представляющая собой инфинитив глагола русского языка, а на выходе получаем выходную цепочку. Входная и выходная цепочки слагаются из литер алфавита A , состоящего из букв русского алфавита и некоторого вспомогательного символа «—», заменяемого в дальнейшем на одну из букв русского алфавита.

Каждый из этапов работы алгоритма связан с проверкой на последовательное вложение цепочек из конечного словаря S_i в подаваемую на вход цепочку (индекс i указывает номер словаря и этапа, на котором он применяется).

Опишем подробнее структуру словарей, используемых в работе алгоритма. Словарь S_1 состоит из пар характерных окончаний инфинитивов глаголов и глагольных форм прошедшего времени мужского рода. Термин окончания отличен от грамматического; под ним подразумевается некоторая подцепочка, находящаяся в конце слова. Словарь S_2 состоит из пар окончаний глаголов прошедшего времени единственного числа мужского рода и некоторого обобщенного окончания глагольных форм прошедшего времени единственного числа женского и среднего рода и множественного числа, из которого может быть получено любое из перечисленных окончаний путем замены символа «—» в конце выходной цепочки на буквы a, o, u соответственно. Словарь S_3 содержит пары окончаний тех глаголов прошедшего времени, которые правильно не могут быть получены из инфинитива обычным путем. Появление словаря S_3 связано с нерегулярностью спряжения русских глагольных словоформ. Словари S_1, S_2, S_3 приведены в приложении.

Отметим особенность построения словарей. В словаре S_i последовательность пар цепочек (s_{ij}, \bar{s}_{ij}) расположена в порядке убывания длин цепочек s_{ij} . Это позволяет избежать неправильных замен, так как могут найтись две цепочки s_{i1} и s_{i2} такие, что цепочка s_{i2} окажется частью цепочки s_{i1} .

Работу каждого этапа алгоритма можно представить в виде процедуры (рис. 1), параметрами которой являются входная v и выходная w цепочки и словарь $S_i = \{s_{ij}, s''_{ij}\}$ ($i = 1, 2, 3; j = 1, 2, \dots, n_i$). Блок-схема алгоритма представлена на рис. 2.

Работу i -го этапа алгоритма можно представить следующим образом:

1. $j := 1$ (выбираем первую пару окончаний).

2. Производим операцию вложения цепочки s_{ij} в цепочку v .

3. Если результат операции true, то перейти к п. 4, иначе к п. 6.

4. Формируем выходную цепочку w , состоящую из остатка t входной цепочки v и приписанной справа цепочки s''_{ij} .

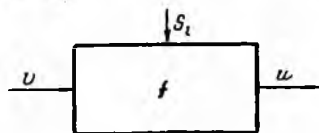


Рис. 1.

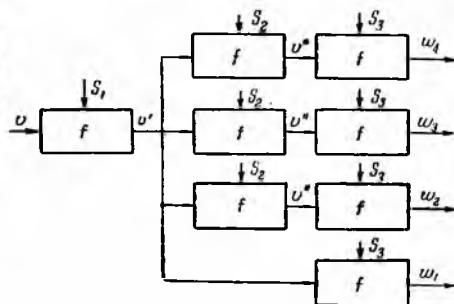


Рис. 2.

5. Выход из блока.

6. $j := j + 1$ (выбираем следующую пару окончаний словаря).

7. Если $j \leq n_i$, то перейти к п. 2, иначе к п. 5.

Приведенный алгоритм был реализован на ЭВМ «Урал-14Д» с использованием алгоритмического языка АЛГОЛ-ЦЭМИ. Выбор именно этого языка объясняется наличием ряда расширений (по сравнению с эталонным языком АЛГОЛ-60), позволяющих производить обработку текстовой информации.

Перечислим основные из них.

1. Введены текстовые величины и действия над ними.

2. Значение текстовых величин — последовательность литер. Литерой является буква, цифра, знак операции, разделители и некоторые специальные знаки. Каждая литера в строке занимает отдельную позицию. Позиции считаются занумерованными слева направо. Количество литер в текстовом значении называется длиной. Допускаются пустые строки, не содержащие ни одной литеры. В качестве изображения текстовой константы используется строка литер, ограниченная кавычками для строк, имеющих вид: « '' » (верхняя левая дуга) и « ' » (верхняя правая дуга).

3. В число описаний языка входит текстовый описатель, представляющий собой символ text, за которым может следовать взятое в круглые скобки целое без знака. Целое без знака не должно превышать 128.

С л о в а р ь S₁

<i>i</i>	<i>s'₁ᵢ</i>	<i>s''₁ᵢ</i>
1	торгнуть	торг
2	клизнуть	клиз
3	дерзнуть	дерзнул
4	жолкнуть	жолк
5	молкнуть	молк
6	меркнуть	мерк
7	горкнуть	горк
8	брякнуть	брякнул
9	звякнуть	звякнул
10	хрипнуть	хрип
11	-терпнуть	-терп
12	креснуть	крес
13	глохнуть	глох
14	дряхнуть	дрях
15	рубнуть	рубнул
16	лебнуть	лебнул
17	бегнуть	бег
18	юзгнуть	юзг
19	тигнуть	тиг
20	ергнуть	ерг
21	чезнуть	чез
22	лекнуть	лек
23	никнуть	ник
24	мокнуть	мок
25	выкнуть	вык
26	репнуть	реп
27	липнуть	лип
28	сипнуть	сип
29	-гаснуть	-гас
30	виснуть	вис
31	киснуть	кис
32	пахнуть	пах
33	чахнуть	чах
34	тихнуть	тих
35	сохнуть	сох
36	-бухнуть	-бух
37	пухнуть	пух
38	стынуть	стыл
39	скрести	скреб
40	рзнуть	рз
41	узнуть	уз
42	язнуть	яз
43	якнуть	як
44	сереть	серел
45	беречь	берег
46	облечь	облек
47	грести	греб
48	бнуть	б
49	ереть	ер
50	влечь	влек
51	бречь	брег
52	расти	рос
53	нести	нес

<i>i</i>	<i>s'₁ᵢ</i>	<i>s''₁ᵢ</i>
54	печь	пек
55	речь	рек
56	сечь	сек
57	течь	тек
58	лочь	лок
59	идти	тел
60	ести	ел
61	юсти	юл
62	йти	шел
63	зти	з
64	сти	с
65	сть	л
66	зть	з
67	ти	л
68	ть	л
69	чь	г

С л о в а р ь S₂

<i>i</i>	<i>s''₂ᵢ</i>	<i>s'''₂ᵢ</i>
1	л	л-
2	б	бл-
3	г	гл-
4	з	зл-
5	к	кл-
6	п	пл-
7	р	рл-
8	с	сл-
9	х	хл-

С л о в а р ь S₃

<i>i</i>	<i>s'₃ᵢ</i>	<i>s''₃ᵢ</i>
1	терпнул-	терпл-
2	толокл-	толкл-
3	бжегл-	божгл-
4	джегл-	дожгл-
5	зжегл-	зожгл-
6	сжегл-	сожгл-
7	тжегл-	тожгл-
8	жегл-	жгл-
9	бчел-	бочл-
10	дчел-	доchl-
11	зчел-	зоchl-
12	счел-	соchl-
13	тчел-	тоchl-
14	чел-	chl-
15	тел-	tl-

Переменные, элементы массива, идентификаторы процедур или формальные параметры, которым описанием или спецификацией задан тип `text` (<целое без знака>), могут принимать лишь текстовые значения, длина которых не превышает величины целого без знака. Отсутствие спецификации длины означает максимальную длину, равную 128.

4. Имеются операции соединения текстовых значений и выделения части текстового значения. Результатом соединения двух текстовых значений является новая строка, составленная последовательно из литер первого и второго текстовых значений. Операция соединения текстовых значений представляется знаком «|» (вертикальная черта). Выделение части первичного текстового выражения, каким является строка, переменная, указатель функции или текстовое выражение, взятое в круглые скобки, осуществляется с помощью выделителя, следующего за этим первичным текстовым выражением и имеющего вид `from` <первичное индексное выражение> `thru` <индексное выражение>. Действие выделителя состоит в выделении подпоследовательности литер из значения предшествующего ему текстового выражения: выделяются литеры, начиная с занимающей позицию под номером, определяемым значением первого индексного выражения выделителя и кончая литерой, занимающей позицию под номером, определяемым значением второго индексного выражения включительно.

Одно из выражений выделителя вместе с предшествующим ему символом `from` или `thru` может быть опущено. Пустое начало выделителя эквивалентно началу выделителя `from 1`. Пустой конец выделителя эквивалентен концу выделителя `thru n`, где n — длина значения текстового выражения.

5. Текстовые значения могут быть операндами операции отношения равенства и неравенства.

Приведенный выше алгоритм работы блоков реализован в виде следующей процедуры:

```

procedure f (v, w, S, n); value n;
text (20) v, w; text (20) array (2) S; integer n;
begin
  - integer i, k, l;
  for k := 1 step 1 until n do
    begin
      l := if S [k, 1] thru 1 = '—' then 2 else 1;
      for i := l step 1 until 20 do
        if (v from i) = (S [k, 1] from l thru 20 - i + 1) then
          begin
            w := (v thru i - 1) | S [k, 2];
            go to exit
          end
        end
      end;
  exit : end f.

```

Формальными параметрами процедуры являются: v — входная цепочка символов; w — выходная цепочка символов; S — идентификатор словаря, представляющего собой двумерный текстовый массив; n — размерность словаря (количество входящих в него пар цепочек).

ЛИТЕРАТУРА

1. Грамматика русского языка. Т. 1. Под ред. В. В. Виноградова. М., Изд-во АН СССР, 1960. 720 с.
2. Транслятор АЛГОЛ-ЦЭМИ для ЭВМ «Урал-14». Инструкция. М., 1971. 24 с. Авт.: К. С. Кузьмин, М. Р. Левинсон, И. В. Максимова, А. В. Юнисова.

УДК 681.142.36

Э. П. ЧОРНОШТАН

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЛОГИЧЕСКОГО ВЫДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОПИСАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ. СООБЩЕНИЕ 2*

Динамическое хранение первичной информации. Для схемной реализации системы анализа, предложенной в работе [1], необходимо обеспечить прежде всего возможность динамического хранения информации о графической структуре знаков. Обычно анализ изображения предъявленного знака выполняется после того, как весь знак просмотрен и информация о его графической структуре занесена в память распознающего устройства в виде матрицы первичных признаков $\{X_{ij}\}$ ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$).

Так как анализ локальных участков изображений выполняется в пределах «окошка», размеры которого значительно меньше размеров знаков, нет необходимости выполнять анализ структуры знаков по указанному выше принципу. Вполне достаточно обеспечить динамическое хранение информации о структуре знаков с площадки, размеры которой определяются величиной «окошка».

В устройствах распознавания, использующих электронно-оптическую развертку типа «бегущий луч», при которой обзор поля зрения автомата выполняется последовательно, наиболее удобными устройствами динамического хранения информации являются сдвигающие регистры, в которых содержание изменяется по мере перемещения знака в поле зрения автомата. Одновременно с перемещением информации через сдвигающие регистры выполняется анализ изображения, что позволяет получить большее быстродействие, чем в случае анализа изображения после полного считывания и записи в памяти автомата.

* Окончание. Начало см. в сб. «Проблемы бионики», вып. 13, с. 114—121.

Для обеспечения логического анализа структуры изображений при помощи «окошка» размером 2×2 достаточно иметь два сдвигающих регистра, каждый из которых должен хранить информацию, полученную при одном шаге сканирования. Таким образом, знак как бы рассматривается устройством анализа через некоторую «щель», высота которой несколько больше высоты знака, а ширина равна двум шагам сканирования. При этом знак перемещается перед «щелью» слева направо (рис. 1, а),

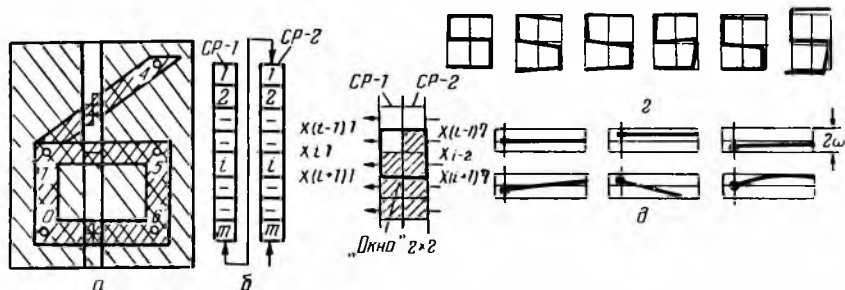


Рис. 1.

информация о состоянии поля изображения на предыдущем шаге сканирования записывается на сдвигающий регистр $CP-1$, информация, полученная на текущем шаге сканирования, — на $CP-2$. Для графической иллюстрации состояния сдвигающих регистров при анализе изображений на этом же рисунке показана часть регистров, на которых хранится информация о наклонной линии с положительным углом наклона.

Выходы обоих регистров подаются на схему логического анализа. Информация, поступающая с этих выходов, представляет собой только часть булевого пространства $\{X_{ij}\}$ первичных признаков, ограниченного двумя столбцами, благодаря чему матрица размером $m \times n$ в каждый момент времени представлена в виде двухстолбцовой матрицы

$$\begin{array}{c} X_{11}, X_{12} \\ X_{21}, X_{22} \\ \hline X_{i1}, X_{i2} \\ \hline X_{m2}, X_{m2} \end{array} \quad (1)$$

Остальные столбцы матрицы формируются во времени по мере перемещения знака в поле зрения автомата. Для упрощения дальнейшего изложения необходимо ввести некоторые изменения как в уравнения элементарных логических признаков, так и в уравнения локальных признаков. Все эти изменения внесены в виде таблицы.

Зоны вариаций признаков. Введение ограничительных (нормализующих) рамок и правил начертания знаков не исключает полностью множества различных начертаний знаков одного и

того же класса. Анализ особенностей письма человека в условиях наличия различного рода ограничений показывает, что знаки в целом (а особенно их отдельные элементы) отличаются в начертании друг от друга не только формой, длиной, но и местом расположения относительно линий нормализующих рамок. На рис. 1, г показано несколько характерных начертаний цифры 5 с различного рода отклонениями от правил начертания эталонного знака.

Обозначение контура линии	Логическая ситуация в «окне»	Уравнение локального признака в пространстве $\{X_{ij}\}$	Уравнение локального признака в пространстве ЭЛП	Обозначение локального признака
$T_{\epsilon}^{\alpha B}$	i	$[(\bar{X}_{i1} \wedge X_{(i+1)1}) \wedge (\bar{X}_{i2} \wedge X_{(i+1)2})]t_j$	$[Y_{i1}^{\alpha B} \wedge Y_{i2}^{\alpha B}]t_j$	$Z_{it_j}^{\alpha B}$
$T_{\epsilon}^{\alpha H}$	l	$[(X_{i1} \wedge \bar{X}_{(i+1)1}) \wedge X_{i2} \wedge \bar{X}_{(i+1)2}]t_j$	$[Y_{i1}^{\alpha H} \wedge Y_{i2}^{\alpha H}]t_j$	$Z_{it_j}^{\alpha H}$
$T_{\epsilon}^{\gamma J}$	i	$[(\bar{X}_{i1} \wedge X_{i2}) \wedge (\bar{X}_{(i+1)1} \wedge X_{(i+1)2})]t_j$	$[Y_{i1}^{\gamma J} \wedge Y_{(i+1)1}^{\gamma J}]t_j$	$Z_{it_j}^{\gamma J}$
$T_{\epsilon}^{\gamma \Pi}$	i	$[(X_{i1} \wedge \bar{X}_{i2}) \wedge (X_{(i+1)1} \wedge \bar{X}_{(i+1)2})]t_j$	$[Y_{i1}^{\gamma \Pi} \wedge Y_{(i+1)1}^{\gamma \Pi}]t_j$	$Z_{it_j}^{\gamma \Pi}$
$T_{\epsilon}^{\beta B}$	i	$[(X_{i1} \wedge \bar{X}_{i2}) \wedge (X_{(i+1)2} \wedge \bar{X}_{i2})]t_j$	$[Y_{i1}^{\beta B} \wedge Y_{i2}^{\alpha B}]t_j$	$Z_{it_j}^{\beta B}$
$T_{\epsilon}^{\beta H}$	i	$[(X_{i1} \wedge \bar{X}_{(i+1)1}) \wedge (\bar{X}_{(i+1)1} \wedge X_{(i+1)2})]t_j$	$[Y_{i1}^{\beta H} \wedge Y_{(i+1)1}^{\gamma J}]t_j$	$Z_{it_j}^{\beta H}$
$T_{\epsilon}^{\delta B}$	i	$[(\bar{X}_{i1} \wedge X_{i2}) \wedge (\bar{X}_{i1} \wedge X_{(i+1)1})]t_j$	$[Y_{i1}^{\delta B} \wedge Y_{i1}^{\alpha B}]t_j$	$Z_{it_j}^{\delta B}$
$T_{\epsilon}^{\delta H}$	i	$[(X_{i2} \wedge \bar{X}_{(i+1)2}) \wedge (\bar{X}_{(i+1)2} \wedge X_{(i+1)1})]t_j$	$[Y_{i2}^{\delta H} \wedge Y_{(i+1)1}^{\gamma \Pi}]t_j$	$Z_{it_j}^{\delta H}$

Психологические особенности письма человека не позволяют водить очень жесткие требования к начертанию знаков. Даже подготовленные операторы не в состоянии писать абсолютно точно по линиям нормализующих рамок. Статистические исследования показали, что после соответствующего разъяснения правил написания в начертаниях знаков отсутствуют элементы, сильно искажающие форму знаков. Расположение линий знаков

около линий нормализующих рамок таково, что подавляющая масса линий (признаков) располагается в пределах некоторых зон определенной ширины. Исходя из роли, которую играют эти зоны в формировании описания каждого знака в отдельности, их можно назвать зонами вариаций признаков (ЗВП).

На рис. 1, д укрупненно показаны также характерные отклонения начертания горизонтальных линий: параллельное смещение относительно линий нормализующей рамки, перекосяк и различного рода искривления. Кроме того, встречаются укорочения или удлинения линий, появление разрывов или помех в виде черных пятен и т. д.

Количество различных начертаний одного и того же признака в пределах зоны шириной 2ω стремится к бесконечности в случае непрерывного изображения. В реальных же условиях изображение дискретизируется на вполне определенное количество элементов, а следовательно, ширина зоны может быть выражена через некоторое число элементов разложения.

В связи с действием помех и наличием признаков различной длины необходимо ввести некоторый порог ϵ , обеспечивающий надежное различие линий, длина которых $L \geq \epsilon$.

Способ и схема преобразования локальных признаков горизонтальных линий в знаковые признаки. Сделанные выше замечания относительно свободы начертания признаков в пределах зон вариаций ставят в прямую зависимость надежность распознавания от надежности выделения (опознания) отдельных знаковых признаков. С этой точки зрения возникает несколько новых задач, связанных с обеспечением высокой надежности распознавания.

Уравнения знаковых признаков T_{ξ}^a , T_{ξ}^b , T_{ξ}^c , T_{ξ}^d [1] получены при условиях непрерывности и равномерности начертания линий. В реальных же условиях разрывы в линиях, неравномерность нанесения краски даже в пределах одного знака, а также различного рода помехи неизбежны. Поэтому применять указанные уравнения для их осуществления в реальных схемах нецелесообразно.

Функция преобразования локальных признаков в знаковые должна быть построена таким образом, чтобы обеспечивалось надежное выделение с учетом множества возможных начертаний этих признаков в условиях различных искажений и помех.

Принятая методика временного накопления информации с наличием в структуре предъявленного знака тех или иных локальных признаков, а также то обстоятельство, что горизонтальные знаковые признаки и «смотровая щель» перпендикулярны друг другу, позволяет сделать вывод о целесообразности использования накопительного устройства с некоторым порогом срабатывания в качестве функционального устройства преобразования локальных признаков горизонтальных линий в знаковые признаки. А если это так, то в уравнениях линий из группы гори-

горизонтальных признаков конъюнкцию как знак, отражающий пространственное расположение этих признаков в поле зрения автомата, необходимо заменить на знак суммы, отражающий временное взаимоотношение горизонтального признака и «смотровой щели», например:

$$T_{\xi}^{aB} = \bigvee_{i=1}^{m+\omega-1} v_{\xi}^{aB} = \begin{cases} 1 & \text{при } v_{\xi}^{aB} = \sum_{t_j=t_1}^{t_k} Z_{it_j}^{aB} - \varepsilon_a \geq 0, \\ 0 & \text{при } v_{\xi}^{aB} = \sum_{t_j=t_1}^{t_k} Z_{it_j}^{aB} - \varepsilon_a < 0, \end{cases} \quad (2)$$

где ε_a — порог горизонтальных признаков;

$$t_j = t_1, t_2, \dots, t_k;$$

t_1 — время обнаружения знака;

t_k — время окончания считывания знака.

Уравнение (2) является общим для всех признаков верхнего контура горизонтальных линий, находящихся в пределах всего поля зрения автомата. Нас же интересует построение устройств преобразования локальных горизонтальных признаков в знаковые признаки, которые должны быть «привязаны» к определенному месту (адресу) в описании знаков. Знаковые признаки формируются в пределах ЗВП. Поэтому в качестве адреса знакового признака можно принять зону формирования признаков (ЗФП), которая отличается от ЗВП тем, что учитывает смещение признаков относительно не только нормализующих линий, но и сдвигающих регистров динамической памяти. Это смещение из-за перекоса документов по отношению к считывающей аппаратуре, различных помех, вызывающих неточное определение нижней границы строки поисковой апертурой [2] и т. д.

Исходя из этих соображений, уравнения знаковых признаков T_{2-4}^{aB} и T_{2-4}^{aH} , формирующихся в пределах ЗФП-1 (рис. 2), можно представить в виде

$$T_{2-4}^{aB} = \bigvee_{i=1}^{2\omega} v_{2-4}^{aB} = \begin{cases} 1 & \text{при } v_{2-4}^{aB} \geq 0, \\ 0 & \text{при } v_{2-4}^{aB} < 0, \end{cases} \quad (3)$$

где

$$v_{2-4}^{aB} = \sum_{t_j=t_1}^{t_k} Z_{it_j}^{aB} - \varepsilon_a;$$

$$T_{2-4}^{aH} = \bigvee_{i=1}^{2\omega} v_{2-4}^{aH} = \begin{cases} 1 & \text{при } v_{2-4}^{aH} \geq 0, \\ 0 & \text{при } v_{2-4}^{aH} < 0. \end{cases} \quad (4)$$

В выражении (4)

$$v_{2-4}^{aH} = \sum_{t_j=t_1}^{t_k} Z_{it_j}^{aH} - \varepsilon_a.$$

При этом

$$T_{2-4}^{\alpha} = T_{2-4}^{\alpha B} \vee T_{2-4}^{\alpha H}. \quad (5)$$

В (4), (5) индексы у знака дизъюнкции определяют границы зоны формирования знаковых признаков. Уравнение (5) объединяет информацию о горизонтальной линии после отдельного формирования знаковых признаков по верхнему и нижнему контурам. Целесообразность такого объединения обусловлена различиями рода потерями информации, вызванными действием помех и искажений, а также потерями, возникающими в результате взаимодействия друг с другом знаковых признаков в пределах одного знака.

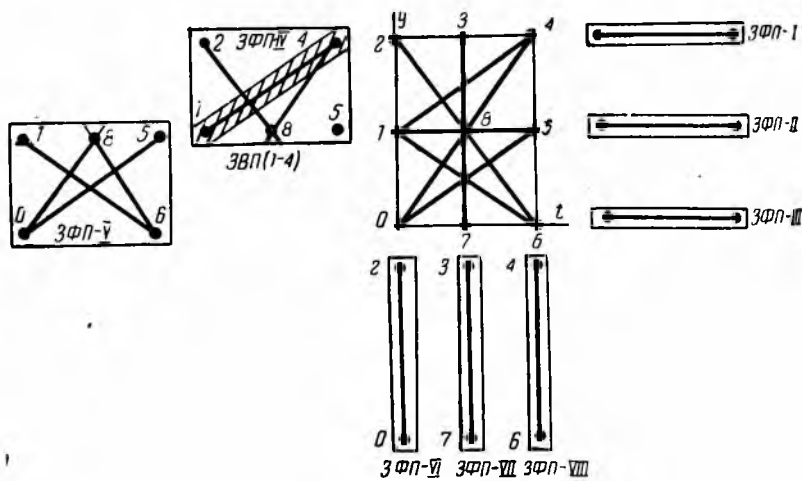


Рис. 2.

Так, в знаковом признаке T_{1-5}^{α} (рис. 1, а) количество локальных горизонтальных признаков по верхнему контуру больше, чем по нижнему, вследствие того, что часть локальных признаков по нижнему контуру исчезает в областях точек закрепления 1 и 5 (рис. 1, а), где признак взаимодействует с вертикальными признаками знака. В нижней части знака (в ЗФП-III) наблюдается противоположная ситуация: количество локальных признаков по нижнему контуру больше, чем по верхнему (признак T_{0-6}^{α}).

Функциональное устройство преобразования локальных признаков в знаковый признак T_{ξ}^{α} реализовано в виде двух накопительных схем, соединенных с некоторыми пороговыми устройствами (рис. 3, а).

Для простоты технической реализации схемы преобразования объединение информации о наличии признаков по верхнему и

нижнему контурам целесообразнее выполнить на более низком уровне, т. е. на уровне локальных признаков.

При этом

$$T_{2-4}^{\alpha} = \bigvee_{i=1}^{2\omega} v_{2-4}^{\alpha} = \begin{cases} 1 & \text{при } v_{2-4}^{\alpha} \geq 0, \\ 0 & \text{при } v_{2-4}^{\alpha} < 0, \end{cases} \quad (6)$$

где

$$v_{2-4}^{\alpha} = \left[\sum_{t_j=t_1}^{t_k} (Z_{tt_j}^{\alpha B} \vee Z_{tt_j}^{\alpha H}) - \varepsilon_{\alpha} \right]. \quad (7)$$

— функция формирования горизонтальных знаковых признаков.

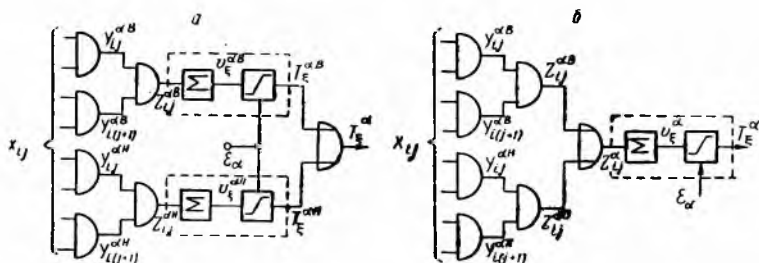


Рис. 3.

Схемная реализация этого принципа объединения информации (рис. 3, б) имеет один формирующий узел. Остальные знаковые признаки этой же группы формируются в ЗФП-II и ЗФП-III (рис. 2) по такому же принципу, как и признаки T_{2-4}^{α} .

Уравнение и схемы формирования наклонных знаковых признаков. В идеальном случае зоны формирования наклонных знаковых признаков типа T_{0-5}^{α} , T_{1-4}^{β} , T_{1-6}^{β} занимают половину площади поля зрения автомата. В реальных же условиях ширина зоны несколько больше из-за перемещения точек закрепления наклонных признаков относительно нормализующих линий. Если принять ширину зон, в пределах которых перемещаются точки закрепления, равной ширине горизонтальных признаков, то ширина зон формирования наклонных признаков вдоль оси y составит $(m/2 + \omega)$. При этом зоны частично перекрывают друг друга, а информация о наличии локальных участков с признаками наклонных линий поступает в устройства формирования знаковых признаков на протяжении всего времени осмотра знаков. Если информацию о верхнем и нижнем контурах объединить на уровне локальных признаков, то схему выделения наклонных линий с положительным углом наклона, расположенных в ЗФП-IV (рис. 2), можно построить согласно уравнению

$$T_{1-4}^{\delta} = \bigvee_{l=1}^{m/2+\omega} v_{1-4}^{\delta} = \begin{cases} 1 & \text{при } v_{1-4}^{\delta} \geq 0, \\ 0 & \text{при } v_{1-4}^{\delta} < 0, \end{cases} \quad (8)$$

где

$$v_{1-4}^{\delta} = \left\{ \sum_{t_j=t_1}^{tk} [Z_{it_j}^{\delta B} V Z_{it_j}^{\delta H}] - \varepsilon_{\delta\beta} \right\}$$

— функция формирования наклонных знаковых признаков с положительным углом наклона;

$\varepsilon_{\delta\beta}$ — порог наклонных признаков.

В этой же зоне формируются наклонные признаки с отрицательным углом наклона

$$T_{2-5}^{\beta} = \prod_{l=1}^{m/2+\omega} v_{2-5}^{\beta} = \begin{cases} 1 & \text{при } v_{2-5}^{\beta} \geq 0, \\ 0 & \text{при } v_{2-5}^{\beta} < 0, \end{cases} \quad (9)$$

где

$$v_{2-5}^{\beta} = \left\{ \sum_{t_j=t_1}^{tk} [Z_{it_j}^{\beta B} V Z_{it_j}^{\beta H}] - \varepsilon_{\delta\beta} \right\}$$

— функция формирования этих признаков.

Аналогичный вид имеют уравнения наклонных знаковых признаков, находящихся в ЗФП-V (рис. 2).

Особо следует остановиться на знаковых признаках T_{2-8}^{δ} и T_{8-4}^{β} из тех же групп наклонных признаков, но с порогом в два раза меньшим, чем у рассмотренных выше знаковых признаков. Уравнение их функций формирования имеет вид

$$v_{2-8}^{\delta} = \left\{ \sum_{t_j=t_1}^{tn, 2+\omega} [Z_{it_j}^{\delta B} V Z_{it_j}^{\delta H}] - \frac{1}{2} \varepsilon_{\delta\beta} \right\}. \quad (10)$$

Логика построения схем, реализующих уравнения наклонных знаковых признаков, и схем выделения горизонтальных знаковых признаков одна и та же.

Уравнения и схемы преобразования вертикальных знаковых признаков. Взаимное расположение вертикальных признаков и «смотровой щели» таково, что не позволяет использовать функцию преобразования, применяемую для горизонтальных и наклонных признаков. Кроме того, если информация о горизонтальных и наклонных линиях поступает в устройства формирования на протяжении всего времени осмотра знака, то для выделения конкретных вертикальных знаковых признаков время поступления информации о наличии локальных признаков их контуров необходимо ограничить пределами зон формирования (рис. 2). На этом основании трансформация локальных признаков в знаковые при помощи устройства временного накопления для вертикальных признаков неприемлема.

Если рассмотреть идеальный случай начертания вертикального признака (рис. 4, а), то функцию преобразования можно было бы реализовать, используя ранее полученное уравнение [1]

$$T_{\xi}^{\Pi} = \prod_{t_j=t_A}^{t_B} \left[\prod_{l=1}^{m+\omega} Z_{it_j}^{\Pi} \right]$$

и ввести некоторые изменения, учитывающие наличие зон формирования:

$$T_{\xi}^{\Pi} = \bigvee_{t_j=t_A}^{t_B} \left[\bigwedge_{i=1}^{m+\omega} Z_{it_j}^{\Pi} \right]. \quad (11)$$

Функциональное устройство преобразования, реализованное на основе этого уравнения, будет совершенно не защищенным по отношению к различным изменениям в идеальном начертании признаков (разрывы в линиях, нарушение строгой вертикальности, наличие помех и т. д.) потому, что конъюнкция не допускает равенства нулю хотя бы одного из своих членов.

С этой точки зрения функция преобразования обязана учитывать реальные условия начертания признаков, т. е. должна быть более гибкой по отношению к количеству локальных признаков вертикальной линии, находящейся в поле зрения «смотровой щели». В этом смысле наиболее подходящей может быть функция, реализуемая пороговым элементом [3]

$$v_{\xi}^{\Pi} = \bigvee_{t_j=t_A}^{t_B} \left[\sum_{i=1}^{m+\omega} Z_{it_j}^{\Pi} - \epsilon_{\tau} \right], \quad (12)$$

где ϵ_{τ} — порог вертикальных признаков.

Согласно этому уравнению, предполагается, что в некоторый момент времени t_{AB} (рис. 4) на выходах фильтров локальных признаков вертикальных линий количество элементов, имеющих единичное состояние, превысит некоторый порог ϵ_{τ} . Но одновременное появление всех локальных признаков некоторой вертикальной линии в поле зрения «смотровой щели» — явление менее вероятное, чем раздельное появление этих признаков (рис. 4, б) на протяжении t_{AB} . Поэтому возникает необходимость в запоминании информации о наличии локальных признаков вертикальной линии на время, равное t_{AB} .

В качестве памяти можно использовать параллельный регистр, на входы которого целесообразно подавать информацию от фильтров направлений как по левому, так и по правому контурам вертикальной линии.

На основании сказанного функцию порогового элемента через локальные признаки можно выразить следующим образом:

$$v_{\xi}^{\Pi} = \sum_{i=1}^{m+\omega} v_i^{\Pi} - \epsilon_{\tau}, \quad (13)$$

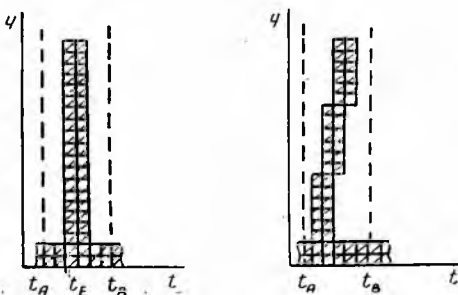


Рис. 4.

где

$$v_j = \bigvee_{t_i=t_A}^{t_B} [Z_{ii}^{\Gamma\Pi} \vee Z_{ii}^{\Pi\Gamma}]. \quad (14)$$

Уравнения функций преобразования конкретных знаковых признаков группы вертикальных признаков имеют вид (13) и отличаются только временем начала и конца формирования зон (рис. 2).

Кроме признаков, расположенных вдоль всей зоны вариаций, имеются вертикальные знаковые признаки, занимающие только половину зоны. Поэтому уравнения этих признаков имеют порог, равный $\frac{1}{2}\epsilon_{\Gamma}$. В целях упрощения схемы анализа целесообразно выделять только короткие признаки, а для определения наличия длинных вертикальных признаков использовать конъюнкции типа

$$T_{0-2}^{\Gamma} = T_{0-1}^{\Gamma} \wedge T_{1-2}^{\Gamma}. \quad (15)$$

ВЫВОДЫ

1. При наличии большого количества инвариантных начертаний рукописных нормализованных знаков изложенная методика формирования системы логического анализа изображений позволяет построить простую и надежную систему распознавания на основе дискретных логических элементов.

2. Для формирования описаний изображений существенна ширина зон вариаций и зон формирования признаков. Поэтому задачей дальнейшего исследования является теоретическое и практическое обоснование выбора допустимой ширины этих зон.

3. В реальных условиях обработки оптической информации при написании и обработке знаков возникают помехи и искажения, что сильно влияет на надежность распознавания. В связи с этим большой интерес представляет теоретически обоснованный выбор величины порогов ϵ_{α} , ϵ_{Γ} и $\epsilon_{\delta\beta}$ с учетом статистических особенностей формирования всех групп знаковых признаков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черноштан Э. П. Методика формирования иерархической системы логического выделения характерных параметров описания изображений. Сообщение I. — В. сб.: Проблемы бионики. Вып. 13. Харьков, «Вища школа», 1974, с. 114—121.
2. Черноштан Э. П., Черкашенко Н. И., Пряницкий А. М. Схема управления электроннооптическим преобразователем читающего автомата. — В сб.: Приборы и системы автоматизи. Вып. 25. Харьков, «Вища школа», 1973, с. 57—62.
3. Синтез схем на пороговых элементах. Под ред. Е. Н. Вавилова. М., «Сов. радио», 1970. 368 с.

**О МОДЕЛИРОВАНИИ НЕКОТОРЫХ ПОЛЕЙ, СВОДЯЩИХСЯ
К МАТЕМАТИЧЕСКИМ ОПИСАНИЯМ ТИПА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО
УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ (ДИФФУЗИИ)**

Многие процессы в окружающей нас действительности достаточно адекватно описываются или могут быть эффективно сведены к параболическим дифференциальным уравнениям в частных производных второго порядка. Одним из важнейших уравнений того класса является дифференциальное уравнение теплопроводности, или диффузионное уравнение, которое для краткости запишем в общем виде с неявной формой задания:

$$F\left(x, y, z, U, t, \frac{\partial u}{\partial t}, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) = 0, \quad (1)$$

Здесь однозначное решение определяется различными стоками и истоками для заданной области и следующими граничными условиями (ГУ):

ГУ I рода (первая задача Дирихле в стационарном случае):

$$U|_r = \varphi(s, t); \quad (1a)$$

ГУ II рода (вторая задача Неймана в стационарном случае):

$$\left. \frac{\partial u}{\partial n} \right|_r = \varphi(s, t); \quad (1б)$$

ГУ III рода (третья или смешанная краевая задача):

$$a(s) [u(s, t) - f(s, t)] + b(s) \frac{\partial u(s, t)}{\partial n} = 0 \quad (1в)$$

и начальными условиями (задача Коши):

$$U|_{t=t_0} = f(x, y). \quad (1г)$$

1. Особый интерес представляет то обстоятельство, что для двумерной плоской задачи со стационарной в пространстве областью задания (без членов $\frac{\partial u}{\partial x}$ и $\frac{\partial u}{\partial y}$) уравнение (1) может быть положено в основу семантического сжатия информационных данных (в смысле выделения информативных признаков). При этом описываются отдельные аспекты наиболее совершенной из систем оперативного сжатия — системы зрительного восприятия. Здесь имеется в виду выделение таких информативных признаков, как контуры площади изображения заданных размеров, параметры динамики объектов и др.

1.1. Математической моделью семантического сжатия может служить диффузионное уравнение инерции и иррадиации зрительного восприятия для однородной области [1]:

$$a \frac{\partial B}{\partial t} - b^2 \left(\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial y^2} \right) + B = kE, \quad (2)$$

где a, b, k — константы зрения и входного преобразования; $V = V(x, y, t)$; $E = E(x, y, t)$. При этом kE описывает стоки, а V — истоки однородной моделируемой области. Для неоднородной среды уравнение (2) преобразуется к более универсальному, но более сложному в практической реализации нелинейному виду, получение и анализ которого в нашей задаче не являются необходимыми.

1. 2. Для формального аналогового моделирования зрительных информационных процессов, описываемых диффузионной моделью (2), с помощью простейших моделей-аналогов РС был получен ряд практических следствий, в том числе синтезированы алгоритмы выделения контуров и центральных областей изображения для некоторых технических приложений в АСУ [2]. Особенности технических реализаций этих следствий являются: 1) практически неограниченно высокое быстродействие всего цикла преобразования; 2) высокая помехоустойчивость и возможность минимального квантования информативного описания в результате эффективной интерполирующей иррадиации изображения; 3) универсальность принципов моделирования и преобразования для различных источников ввода и сигналов всего цикла преобразования информационных параметров и др.

1. 3. Целесообразность моделирования уравнения (2) и эффективность реализации множества его следствий могут быть подтверждены ближайшими возможными преимуществами в технических приложениях и обоснованы психофизическими и математическими исследованиями, проведенными на кафедре математического моделирования Харьковского института радиозлектроники. При этом используется достаточно строгое и адекватное описание исследуемого биологического объекта.

Для выделения контуров бионическим прототипом является зрение. Можно полагать, что при выделении центральных областей объектов изображения биопрототипом выступает «обострение» [3] для органа слуха. Предполагается, что области приложений данных следствий в процессе дальнейших исследований будут значительно расширены за счет такого технически важного биопрототипа, как биологическая память [4].

Особенно актуальной проблемой рассматриваемого оперативного семантического сжатия является выбор информативных выделяемых признаков, индивидуальных для соответствующих областей приложений. Наиболее эффективен и распространен функциональный бионический подход [5]. В нем выбор признаков связан с главными целями функционирования всей системы, включающей исследуемый аппарат информативного выделения признаков (семантического сжатия).

2. Используя диффузионные дифференциальные уравнения с подвижной областью, можно получить исходные описания для рассмотренного в п. 1 семантического сжатия, а также имеющие самостоятельную ценность модели статического сжатия и описания сообщений.

Известно, что исходными данными для ряда основных моделей и алгоритмов статического сжатия является распределение плотности вероятности значений исследуемых параметров. Рассмотрим примеры таких распределений.

2.1. Существенным, использующим дифференциальную модель (1) является статически-семантическое информационное сжатие на базе непрерывного моделирования для оценки плотности вероятности перехода исследуемой системы из начального в конечное заданные состояния. Здесь семантический аспект состоит в априорном выборе параметров конечного состояния и исходного графа состояний, а статический аспект описывается диффузионным дифференциальным уравнением Фоккера — Планка — Колмогорова:

$$\frac{\partial f_n(\vec{x}|\vec{\xi})}{\partial \eta} = \sum_{v=1}^n A_v(\vec{\xi}) \frac{\partial f_n(\vec{x}|\vec{\xi})}{\partial \xi_v} + \frac{1}{2} \sum_{v,\mu=1}^n B_{v\mu}(\vec{\xi}) \frac{\partial^2 f_n(\vec{x}|\vec{\xi})}{\partial \xi_v \partial \xi_\mu}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial f_n(\vec{x}|\vec{\xi})}{\partial \eta} = \sum_{v=1}^n \frac{\partial [A_v(\vec{x}) f_n(\vec{x}|\vec{\xi})]}{\partial x_v} + \frac{1}{2} \sum_{v,\mu=1}^n \frac{\partial^2 [B_{v\mu}(\vec{x}) f_n(\vec{x}|\vec{\xi})]}{\partial x_v \partial x_\mu}. \quad (4)$$

Постановка задачи 2.1, описываемой уравнениями (3), (4), сводится к следующему.

Исходными данными являются: 1) распределение значений векторов начального состояния $\vec{\xi} = \langle \xi \rangle$ причем $\vec{\xi} \in \Gamma$, где Γ — область задаваемых граничных условий; 2) распределение интересующих исследователя координат векторов конечного состояния $\vec{x} = \langle x \rangle$; 3) коэффициенты A и B , определяемые соответствующими значениями распределений.

Требуется найти распределение плотности вероятности $f_n(\vec{x}|\vec{\xi})$ при $n = t - \tau$.

Достаточно оперативные и практически эффективные решения (3), (4) даже при $n = 1$ в полном объеме еще не получены. Исследователи ограничиваются частными случаями и стараются свести (3), (4) для начальных моментов «жизни» системы к уравнениям Васильева, Дарлингга, Ланжевена, Стратоновича, Пуассона, а для средних — к уравнениям Понтрягина и Стратоновича — Тихонова [6],

Уравнения (3), (4) при $n = 1$ сводятся к (1), что довольно часто имеет место в реальных приложениях. Можно предположить, что (3), (4) для случая $n = 2$ также могут быть сведены к уравнению (1). При этом успешное осуществление рассматриваемых задач может обеспечить оперативное сжатие промежуточных информационных путей решения и вследствие преимуществ непрерывного моделирования. Степень сжатия обещает быть достаточно внушительной по сравнению с известным матричным методом оценки плотности вероятностей.

2.2. Уравнение (4) интересно применить для исследования и оценки устойчивости системы при экспериментальном опреде-

лении коэффициентов. При постановке задачи, в основном соответствующей предыдущей постановке, конечной целью исследования является нахождение аргументов (управлений) моделируемой функции, при которых в начале координат фазового пространства максимизируется плотность вероятности распределения множества искомым фазовых координат для переходных процессов с флуктуирующими начальными условиями.

Принятое в данном случае удобное разделение классов сжатия на семантические, статистические и структурные методы связано с их основополагающими чертами. Однако оно не может быть строгим, хотя бы потому, что семантический аспект, связанный с конкретным для моделируемой задачи смыслом параметров и организации моделируемой области, присутствует во всех рассмотренных задачах. В наименьшей мере это относится к следующей задаче статистического сжатия сообщений.

2.3. Задача оценки распределения вероятности приращений информационных сигналов определяется известным подвидом диффузионного уравнения (1) — вторым дифференциальным уравнением Колмогорова:

$$\frac{\partial f_i(v)}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x_i(t+l\tau)} \{a_i[l\tau, x_i(t+l\tau)], f_i(v)\} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial x_i^2(t+l\tau)} \{b_i[l\tau, x_i(t+l\tau)], f_i(v)\}. \quad (5)$$

По заданным значениям начальных и текущих параметров $x_i(t)$, $x_i(t+l\tau)$, где $l = 1, 2, 3$, в (5) необходимо найти $f_i(v)$ — распределение плотности вероятности их приращений. Коэффициенты a_i , b_i описываются соответствующими функциями математических ожиданий для ближайших по времени приращений. Частным случаем данной модели является описание однородных марковских процессов с независимыми приращениями. Актуальность и важность моделирования рассматриваемой задачи для зависимых и независимых приращений связаны со значительным и универсальным сжатием различных параметрических полей сигналов, и позволяют обнаружить взаимовлияющие факторы и показатели исследуемых объектов и систем.

В связи с успешной разработкой методов и совершенствованием техники оперативного непрерывного моделирования на моделях-аналогах РС можно показать, что соответствующее эффективное непосредственное решение уравнений (3)—(5) целесообразно и в большинстве случаев уже практически возможно.

3. Рассмотрим модель структурно-семантического сжатия в интересующем нас аспекте применения диффузионных моделей. Примером практических задач, описываемых диффузионными дифференциальными уравнениями, может служить определение температурного состояния деталей цилиндрической поршневой группы двигателей внутреннего сгорания для различных режимов работы

и условий охлаждения, что является важнейшим фактором, определяющим работоспособность и эксплуатационную надежность двигателей. Специфика таких задач заключается в сложности области задания, получения неоднородных в пространстве начальных, а также неоднородных, нестационарных во времени граничных условий. Последнее связано со сложностью изменения температур движущихся деталей на различных режимах работы.

Рассматриваемые практические теплофизические задачи описываются частным случаем уравнения (1)*, уравнением Фурье для однородной изотропной среды:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{C_p}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (6)$$

где T — температура;

C_p — объемная удельная теплопроводность;

λ — коэффициент теплопроводности.

Для ряда теплофизических задач в уравнении (6) первая составляющая определяет температурные условия взаимодействия с окружающей средой, а вторая — условия теплообмена между средой и исследуемой областью. Для однозначного решения уравнения (6) с априорно известной областью задания необходимы соответствующие конкретным ситуациям граничные и начальные условия, стоки и истоки.

Опыт практического моделирования и конкретных исследований кратко рассмотренной теплофизической задачи позволяет сделать некоторые выводы о средствах реализации уравнения (6) и обобщить их на случаи, описываемые (2)—(5).

4. Для задач п. 3 особенно эффективно можно использовать гибридные аналого-цифровые средства реализации, в которых базой является аналоговая область задания дискретной (сеточной) или непрерывной модели-аналога РС. Непрерывные модели-аналоги РС вследствие их простоты и оперативности особенно широко применяются в этой области.

Гибридные методы и средства для реализации математических моделей типа (1)—(6) в сочетании с соответствующим подсоединением модели-аналога РС к объекту исследования в реальном масштабе времени универсальны и практически целесообразны. Они позволяют, в частности, автоматически измерять температурные поля теплонпряженных деталей двигателя на стадии конструирования для рассмотренного ранее примера теплофизической задачи, а также для стендовых и рабочих испытаний при любых режимах работы объекта.

Моделирование дифференциальных уравнений теплопроводности на моделях-аналогах РС дает возможность не только исследовать

* Уравнение (1) путем замены переменных сводится к (6). Таким образом, многие общие принципы эффективной реализации (6) могут быть перенесены на (1) и его подвиды (2)—(5).

различные физические поля, но и активно использовать эти модели в системах автоматического регулирования и управления.

Моделирование дифференциальных уравнений теплопроводности (диффузии) на моделях-аналогах РС в ряде случаев может оказаться единственным оперативным средством решения практических задач исследования, проектирования и управления при вводе стохастических параметров для физических и информационных объектов с неполной информацией об их функционировании. Полученные при таком моделировании данные требуют оперативной обработки путем сжатия сообщений, причем здесь особенно эффективны ранее рассмотренные модели и алгоритмы семантического и статистического сжатия.

5. Таким образом, даже краткий анализ моделирования различных видов (3) — (6) диффузионного уравнения (1) для полей информационных и физических параметров позволяет убедиться в том, что область приложений дифференциального уравнения теплопроводности (диффузии), а также средства и методы его моделирования значительно расширены. Пытаясь обобщить и связать некоторые материалы и результаты прикладных исследований аналогового моделирования физических и информационных процессов, мы стремились показать широкий круг практических приложений и выявить возможности получения значительной эффективности их непрерывного моделирования, что может быть успешно реализовано на соответствующих моделях-аналогах РС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Математическая модель инерции иррадиации зрения. — В кн.: Материалы науч. семинаров по теоретическим и прикладным вопросам кибернетики (Семинар «Математические модели в биологии и бионике»). Киев, 1965, с. 3—15. Авт.: Ю. П. Шабанов-Кушнаренко, В. А. Рвачев, А. Г. Мурашко и др.
2. Керемжанов А. Ф. К минимизации информации при распознавании образов в АСУП. — В кн.: Материалы Всесоюз. симпозиума «Применение математических методов и вычислительной техники в прогнозировании производственно-технического развития предприятий и областей народного хозяйства» Кишинев, 1970, с. 9—11.
3. Позин Н. В. Моделирование нейронных структур. М., «Наука», 1970. 230 с.
4. Крайзмер Л. П., Матюхин С. А., Майоркин С. Г. Память кибернетических систем. М., «Сов. радио», 1971. 400 с.
5. Что сообщает глаз лягушки мозгу лягушки? — В кн.: Электроника и кибернетика в биологии и медицине. М., Изд-во иностр. лит., 1963, с. 211—236. Авт.: Дж. Леттвин, Г. Матурана, У. Мак-Каллок, У. Питтс.
6. Васильев Б. В. Прогнозирование надежности и эффективности радиоэлектронных устройств. М., «Сов. радио», 1970. 134 с.

УДК 62. 506. 2

В. С. МАНЕШИН, канд. филос. наук

ПСИХИКА, СОЗНАНИЕ, МЫШЛЕНИЕ

Жизнь, а вместе с ней и активность ее носителя начинаются с возникновения потребностей и установления ввиду необходимости их удовлетворения направленного взаимодействия с окру-

жающей средой. Любое раздражение извне вызывает определенные движения живого «даже там, где еще нет никакой клетки, не говоря уже о нервной клетке» [4, с. 495]. При наличии нервной системы внешнее или внутреннее воздействие преобразуется чувствующими нервами в импульсы, которые при своем движении к центру сознания вызывают соответствующие им физиологические изменения в организме, а затем и в самом нервном центре. В итоге живая система приводится в состояние, сопровождающееся особым рода явлениями. Они как бы возвращают его к исходному пункту взаимодействия, но теперь уже на иной основе, при наличии бесконечного числа не похожих друг на друга сложных и взаимно-переплетающихся процессов.

В результате физиологической деятельности нервного аппарата и некоторых связанных с ним или заменяющих его белковых гел вначале возникают нервные процессы. «Настоящую теорию всех нервных явлений, — указывал И. П. Павлов, — даст нам только изучение физико-химического процесса, происходящего в нервной ткани и фазы которого дадут нам полное объяснение всех внешних проявлений нервной деятельности, их последовательности и связи» [5, с. 48]. Активность нервной системы, в свою очередь, порождает отражающие и одновременно поддерживающие и изменяющие ее психические реакции.

В отличие от нервных, психические явления определяются нейрофизиологическими процессами и благодаря особой системности обеспечивают наряду с отражением объекта также необходимые по отношению к нему движения и действия, предваряющие их внутренние субъективные состояния. Любой психический акт, таким образом, оказывается сложным образованием, единством противоположных, всегда дополняющих друг друга компонентов. При этом следует учитывать и то, что психическое неотделимо от физиологического, не существует вне связи с материей, т. е. с физическим, и вместе с тем отличается от него как специфическое субъективное идеальное образование.

Высшее проявление психической деятельности — отражение объектов, их анализ и синтез, оценка значения для удовлетворения имеющихся у живого существа потребностей. В результате возникает знание о действительности, ее взаимодействующих с организмом предметах и явлениях, одновременно с информацией об окружающей обстановке формируется отношение к ней организма в целом. В этом случае из совокупности психических явлений как бы выделяется та их часть, которая осуществляет познавательную деятельность и называется сознанием. «Способ, каким существует сознание и каким нечто существует для него, это — *знание*», — писал К. Маркс [2, с. 633].

Познание как деятельность имеет место и у животных. Его появление связано с развитием элементарных ощущений и необходимой для поддержания жизнедеятельности избирательной активности. Следовательно, животные, подобные человеку, обладают

сознанием, но в сравнении с человеческим — качественно иного порядка, ограниченным познанием внешних сторон и форм взаимодействия, но не самой сущности объектов. На этой стадии развития сознания субъект все еще не осознает себя и не противопоставляет окружающему миру явлений, сливается с ним.

Становление собственного человеческого сознания происходит на основе трудовой деятельности и в условиях человеческого общежития, общественного бытия людей. Человек вначале, как указывал К. Маркс, осознает лишь ближайшую чувственно воспринимаемую среду и ограниченную связь с находящимися вне начинающего сознавать себя индивида другими лицами и вещами. На более поздней стадии развития знания о предметах дополняются всесторонними знаниями о самом себе, самосознанием. Люди поднимаются до осознания своего бытия, реальных процессов своей жизнедеятельности, превращают ее в предмет «своей воли и своего сознания» [2, с. 565].

Качественный скачок в развитии сознания тесно связан и с формированием речи, языка, как практического средства общения между людьми. Язык дает возможность обобщить и систематизировать данные отражения, проникать в закономерные связи явлений природы и общественной жизни, соотносить результаты индивидуальной познавательной деятельности с добытыми человечеством общими знаниями. Возникновение и реализация относительной независимости языка от конкретных ситуаций общения неизмеримо усилило возможность отвлечения от того или иного конкретного события, способность сознания *«действительно представлять себе что-нибудь, не представляя себе чего-нибудь действительного»* [3, с. 30].

Труд и слово создали человека, они же обусловили и становление мышления на его человеческом уровне. Если сознание есть способность особым образом организованной материи отражать внешний мир, то мышление с самого начала складывается как способность особым образом организованной материи отражать внешний мир, то мышление с самого начала складывается как способность той же материи оперировать результатами отражения и получать в конечном счете необходимые для поддержания жизнедеятельности знания о нем. Мышление — деятельность, процесс, в ходе которого данные в отражении предметы подвергаются анализу и синтезу, сопоставляются между собой и с прошлым опытом, включаются в операции по отбору и переработке информации, решению задач, непосредственно вытекающих из взаимодействия познающего с познаваемым объектом. Вне отражения мышление невозможно, как невозможно оно и вне сопоставления его результатов с потребностями живой системы.

Мышление возникает одновременно с сознанием как свойство чувствующей и реагирующей на внешние воздействия нервной системы, как продукт ее относительно высокого развития. «Так как процесс мышления сам вырастает из известных условий, сам

является естественным процессом, то действительно постигающее мышление может быть лишь одним и тем же, отличаясь только по степени, в зависимости от зрелости развития и, в частности, развития органа мышления», — писал К. Маркс [1, с. 209].

Первоначальное мышление примитивно и оперирует лишь соотнесенными с индивидуальным опытом непосредственными восприятиями, даже у высших представителей животного мира не выходит за пределы так называемого предметного мышления. На этой стадии оно ограничивается задачами осознания ближайшей чувственно воспринимаемой среды и имеет не теоретический, а практический характер, не отрывается от действий и поведения животного.

Человеческое мышление осуществляется в иных формах и на ином качественно преобразованном уровне. Человек оперирует уже не предметами, а понятиями о них, постоянно стремится к тому, чтобы посредством идей выйти за существующую систему знаний и тем самым проникнуть в сущность вещей, познать закономерности развивающегося мира. Мышление человека, в отличие от своего предшественника — мышления животных, разрешает познавательные задачи и выступает в качестве теоретической деятельности.

Человек выделяет себя из окружающего мира, осознает в качестве субъекта практической деятельности и познания и противопоставляет объекту. В широких масштабах осуществляется обобщение и систематизация познанного, соотнесение результатов индивидуального познания с выработанными человечеством в процессе его развития общими знаниями и понятиями. Значительно усиливается также возможность предвидения событий, вероятностного прогнозирования, обеспечения жизни при более сложных и постоянно изменяющихся внешних условиях.

Высшего развития достигает и спонтанная активность мозга. Прямым результатом этого является непрерывное мышление, не обязательно связанное с механизмом рефлекса. Процессы мышления в таком случае зависят не столько от внешних раздражителей, сколько от внутренних причин, от непрерывно действующего мозга. Его электрическая активность при всех состояниях организма свидетельствует в пользу такого вывода и исключает возможность развития процессов мышления путем только рефлекса. Отход от механизма последнего намечается уже в психических актах животных и особенно усиливается в человеческой психике, которая, однако, не порывает с ним полностью и сохраняет его как свою простейшую форму.

Подобно сознанию, мышление неразрывно связано со всеми другими проявлениями психической деятельности и функционирует при наличии лишь нервного субстрата, соответствующих физиологических изменений в нервных центрах. Возникая в психическом акте, мышление в то же время оказывает обратное воздействие на все его другие компоненты и определяет их раз-

витие, поддерживает возбудимость организма на необходимом для него уровне. Мышление принимает участие в осуществлении избирательной активности и вызывает эмоциональные реакции испытывает их влияние, изменяется в зависимости от заданного ими тонуса.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Маркс К.* Письмо Людвигу Кугельману в Ганновер. Лондон, 11 июня 1868 г. — *Маркс К., Энгельс Ф.* Избранные письма. М., Госполитиздат, 1947, с. 208—210.
2. *Маркс К.* Экономическо-философские рукописи 1844 года. — *Маркс К., Энгельс Ф.* Из ранних произведений. М., 1956, с. 517—642.
3. *Маркс К., Энгельс Ф.* Немецкая идеология. — Соч. Изд. 2-е Т. 3, с. 7—544.
4. *Энгельс Ф.* Роль труда в процессе превращения обезьяны в человека. — *Маркс К., Энгельс Ф.* Соч. Изд. 2-е. Т. 20, с. 486—499.
5. *Павлов И. П.* Двадцатилетний опыт объективного изучения высшей нервной деятельности животных. — Полн. собр. соч. Т. III, кн. 2-я. М. — Л., Изд-во АН СССР, 1951, с. 145—223.

УДК 62. 506. 001. 57:1М9

Б. И. КРАВЧЕНКО

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ И ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ФОРМАЛИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ В БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Проблема управления в биологии тесно связана с формализацией и математизацией биологического познания и конечном счете — с развитием и становлением теоретической биологии.

Проникновение формального аппарата оптимальной теории управления в биологию позволило построить разнообразные полезные модели ряда жизненных процессов. Однако эти модельные представления существенно ограничены в отношении познания живых систем как целостных организаций.

Попытки использовать теорию оптимального управления для описания биологических феноменов не привели к ожидаемому положительному результату. В связи с этим возникла необходимость учитывать в формальных конструкциях особенности управления в живых системах.

Разработка соотношения децентрализации и централизации управления, учет иерархичности управления в живых системах, анализ основных уровней управления в организме и обращение к научному направлению, получившему название «теория больших систем», в целях исследования жизненных явлений способствуют распространению организационного подхода к решению проблемы управления в биологии.

Такой подход наиболее адекватен познанию важнейших свойств систем высокого уровня, поскольку категория организации (организмического целого) — есть высшая ступень познания единства объектов действительности. В организационных системах поведение любого элемента некоторым образом влияет на все осталь-

е. Существование отдельных элементов становится невозможным, поскольку в настоящем качестве они представляют собой рождение организации. Органическая взаимосвязь элементов является самой специфической особенностью процессов управления в биологических и социальных системах как системах высокого уровня, а сама организация выступает изоморфным принципом, обеспечивающим формализацию предмета исследования.

В социальных системах (промышленно-экономических, военных и т. д.) функция управления понимается как одна из сторон организации. Для ее анализа применяется метод исследования операций. Тенденция к универсализации данного метода в отношении качественно различных организаций становится все более очевидной, а его переориентация на познание биологических объектов требует конкретного методологического обоснования, скрывающего тождественность биологических и социальных организаций.

Концептуальной посылкой «биологизации» исследования операций служит теория функциональной системы П. К. Анохина. Главным фактором организации функциональной системы является конкретный результат деятельности: «Все функциональные системы независимо от уровня своей организации и от количества составляющих их компонентов имеют принципиально одну и ту же функциональную архитектуру, в которой результат является доминирующим фактором, стабилизирующим организационную систему» [1, с. 39].

Избирательная мобилизация структурных образований, составляющих функциональную систему, представляет собой, по сути, интеграцию, характерную для операционного подхода. Поэтому бедительно выглядит аналогия, проводимая П. К. Анохиным между полезностью результата в биологических и промышленно-экономических системах. Такого же вида аналогия развивается и в отношении важнейших из узловых моментов функциональной системы — постановки цели и принятия решения. При этом И. А. Анохин указывает, что именно в проблеме управления предприятиями возникают вопросы «совершенно схожие с биологическими проблемами «формирования цели и принятия решения, реализующимися на основе специфического механизма афферентного синтеза» [1, с. 47].

При выяснении сущности и основных характеристик или общих принципов исследования операций в качестве основных факторов организации рассматривают постановку цели и обеспечение полезного результата на основании принятия решения. Так, уравнение, описывающее модель принятия решения (операционную модель), выражает собой целевую функцию организации. Параметр этого уравнения, характеризующий качество функционирования системы, символизирует критерий эффективности организации [5, с. 122], т. е. полезный результат. Сформулирован-

ка задачи исследования операций А. А. Ляпуновым сводится к описанию оптимальных, направленных на достижение определенной цели действий некоторого «агрегата». «Система действий такого агрегата получила наименование операции, а ее наилучший вариант — оптимального плана операции, или короче — оптимального решения», — указывает автор [3, с. 6].

«Общая схема» исследования операций адекватна функциональной системе как целостной организации. В рамках этой системы осуществляется постановка цели, выполняющей роль интегрального фактора, который мобилизует динамические структуры в масштабах целого организма на достижение полезного результата. Отношение цели и полезного результата выражается в критическом акте принятия решения.

Цель, выработанная в организации, может быть достигнута посредством нескольких вариантов законченной совокупности действий. Поэтому она несет в себе неопределенность в отношении актуализации будущего результата. В принятии решения эта неопределенность снимается, и формируется конкретная система действий, однозначно обуславливающая результат.

Операционный подход в принципе тождествен целевому подходу, развивающемуся в границах методологии современной биологии. В обоих случаях конечный результат намеченной последовательности действий нельзя установить эмпирически. Он конструируется в форме модели на основании предположения, что результаты организационной деятельности имеются в действительности и рассматривается как цель. Здесь вступает в свои права функциональный способ объяснения деятельности организации, который является модификацией изоморфного принципа последней.

Описание предполагаемого результата — цели позволяет обобщить, как это делается при исследовании операций, фрагментарные математические выражения биологических явлений, которые можно рассматривать в качестве аналогов отдельных членов операционных групп.

Таким образом, оправдывается основная особенность операционной методологии, поиск оптимального управляющего решения с помощью построения математической модели и использования для ее анализа математического аппарата [4, с. 5]. Это объясняется тем, что в случае биологических систем на основании целевого подхода можно осуществить описание через управляемые переменные целевой функции и составление адекватно математической модели задачи об организации управления.

В случае биологической организации становится очевидной также характерная черта операционного подхода — ориентация исследований (анализа) на принятие решения, когда основные результаты анализа должны иметь непосредственное и полностью определенное отношение к выбору способа действий [4, с. 12]. Это вытекает из физиологической интерпретации принятия решения [2, с. 299] и методологического анализа принятия решения в самоуправляемых системах [6, с. 202].

Исходными условиями принятия решения являются поставка цели и организация операции, т. е. построение совокупности целенаправленных действий [7, с. 7].

Цель в живых системах формируется на основе их внутренних процессов. В теории функциональной системы отмечается, что в стадии афферентного синтеза имеется все необходимое для становки цели, являющейся, таким образом, продуктом саморганизации биосистемы. Отсюда следует необходимость сочетания принципов самоуправления и самоорганизации при объяснении управления в биосистемах. Отвлечение от принципа саморганизации в этом случае ведет к механическому извращению понимания управления в биологии как специфическому явлению.

Совокупность целенаправленных действий, которая описывается операцией, актуализируется в виде саморазвивающейся организации, обеспечивающей инвариантность конечного результата действия в соответствии с целью при вариативности средств достижения этой цели. Противоречие вариативности и инвариантности снимается в принятии решения, математическое описание которого дает адекватное знание о содержании управления в живой системе.

Критерий эффективности принятия решения определяется в биосистемах самим ходом развития успешности или неуспешности поведения, поскольку оно в целом представляет собой истинный континуум результатов.

Принципиальное сходство ситуации оценки критериев эффективности в функциональных и промышленно-экономических системах позволило П. К. Анохину продолжить в этом случае цепь удачных аналогий. Комментируя образное выражение экономиста Бросса о необходимости «суда последней инстанции» в оценке полезности управления предприятием, П. К. Анохин подчеркивает: «По сути дела и большие системы организма являются сотканными из малых субсистем. И, наконец, результат деятельности целого организма и является судом последней инстанции» [1, с. 34].

Таким образом, краткий сравнительный анализ принципа функциональной системы и метода исследования операций обнаруживает конкретный путь построения адекватной математической модели организационной системы управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анохин П. К. Принципиальные вопросы общей теории функциональных систем. — В сб.: Принципы системной организации функции. М., «Наука», 1973, с. 7—33.
2. Анохин П. К. Биология и нейрофизиология условного рефлекса. М., «Медицина», 1968. 560 с.
3. Ляпунов А. А. Предисловие к кн.: Исследование операций. [Сб. статей] М., «Наука», 1973, с. 4—10.
4. Акоф Р., Сасиени М. Основы исследования операций. М., «Мир», 1971. 286 с.

5. Гермейер Ю. Б. Введение в теорию исследования операций. М., «Наука» 1971. 253 с.
6. Украинцев Б. С. Самоуправляемые системы и причинность. М., «Мысль» 1972. 127 с.
7. Вагнер Г. Основы исследования операций. Т. 1. М., «Мир», 1972. 215 с.

УДК 621.391.193

А. П. ВАЙНШТОК, В. А. МАХОНИН, канд. техн наук, Н. В. СОМИН

ОПИСАНИЕ РЕЧИ С СОХРАНЕНИЕМ ТОНКОЙ ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ СИГНАЛА

Восприятие речи человеком, как и переработка сообщений об объектах иной физической природы, происходит в виде самонастройки описаний анализируемых сигналов. Опыты с пассивными моделями обработки речи, основанными на использовании спектральных срезов, часто противоречат экспериментам со слухом. Пример такого противоречия — потеря «речевого качества» искусственно периодизированными отрезками речевого сигнала.

Периодизация отрезков длительностью в несколько периодов основного тона не только не нарушает измерений спектральных срезов системой, составленной из резонаторов и детекторов энергии в этих резонаторах, но и повышает качество этих измерений. В спектральных срезах теряется тонкая временная структура речевого сигнала, которая необходима для восприятия речи. Можно предполагать, что резонансные каналы системы слухового анализа (если они существуют) необходимы лишь для ускорения поиска описания, адекватного воспринимаемым сигналам.

Вокализованные звуки речи содержат смесь затухающих колебаний, называемых формантными, и остаток колебаний голосового источника, возбуждавших формантные колебания. На протяжении периода колебаний голосового источника формантные колебания возбуждаются несколько раз. Эти повторные возбуждения особенно отчетливо наблюдаются на осциллограммах звуков с повышенной энергией высокочастотных колебаний.

Для отображения повторных возбуждений формантных колебаний и отдельных фаз в остаточном сигнале голосового источника интервал анализа устанавливается меньшим длительности периода основного тона. В проводимых нами вычислительных экспериментах элементарный интервал анализа принимался равным 3 мсек, элементарные отрезки речевого сигнала выбирались из речевого потока каждую миллисекунду. В пределах элементарного интервала сигнал анализировался путем покомпонентного поиска функций, аппроксимирующих остаточный сигнал, который был получен после вычитания функций, найденных на предыдущих шагах процедуры. Вся совокупность функций составляла неминимальную систему.

Использованный прием вычислений представляет собой упрощение ранее разработанных процедур синтеза экономных описаний в неминимальных сигнальных алфавитах [1, 2]. Упрощение оказалось возможным благодаря различиям энергий формантных колебаний в естественной речи. Всего оказалось 990 функций — это экспоненциально затухающие гармонические колебания, которые действительно встречаются в речи. Помимо формантных колебаний, в систему входили функции, необходимые для кусочной аппроксимации остаточных сигналов голосового источника. Эти функции располагались в частотном диапазоне 50—300 Гц и в диапазоне добротностей 1,0—10. Каждое колебание с заданной частотой и добротностью входило в систему в двенадцати вариантах, отличающихся друг от друга начальными фазами.

Описание элементарного отрезка речевого сигнала было составлено в виде

$$f = \sum_{i=1}^N \alpha_i \varphi_i,$$

где f — описание; α_i — амплитуда i -го колебания; φ_i — i -е колебание. Описание f , все φ и отрезок речевого сигнала s нормируются:

$$\|s\| = \|f\| = \|\varphi_i\| = 1.$$

Процедура поиска описания — пошаговая. Описание на j -м шаге пополнялось функцией $\varphi_{i(j)}$, определяемой из условия

$$i(j) = \arg \max_i \left((s - k f)^{j-1}, \varphi_i \right),$$

где (\cdot) — скалярное произведение; $k = (s, f)^{j-1}$.

Описание пополнялось по правилу

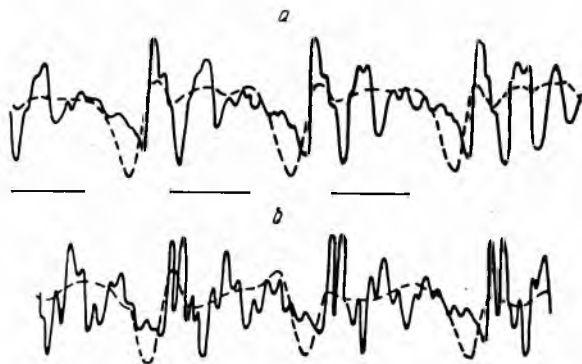
$$f^j = \frac{(s - k f^{j-1}, \varphi_{i(j)}) \varphi_{i(j)} + k f^{j-1}}{\| (s - k f^{j-1}, \varphi_{i(j)}) \varphi_{i(j)} + k f^{j-1} \|}.$$

Пополнение продолжалось до тех пор, пока $\|s - f^j\| \leq \epsilon$, где ϵ задавалось в соответствии с точностью записи и оцифровки натуральной речи. Описанный алгоритм был реализован на ЭЦВМ БЭСМ-6 в форме подпрограмм, которые являлись процедурами в системе ГРАФ, предназначенной для решения задач переработки речевой информации [3]. Одна из процедур осуществляла генерацию функций сигнального алфавита $\{\varphi_i\}$, с помощью других функций из этого алфавита аппроксимировался элементарный отрезок речевого сигнала.

Для проведения вычислительных экспериментов использовались соответствующие гласным звукам отрезки сигнала на хранящихся в архиве системы ГРАФ реализациях речевых команд. Речь, профильтрованная в низкочастотном цифровом фильтре,

отсчитывалась с частотой 10 кГц. Элементарный отрезок речевого сигнала содержал 30 отсчетов.

Выводились параметры колебаний, входящих в описание элементарного отрезка речевой волны (частота, добротность, фаза и амплитуда), и шивались описания сигнала-остатка голосового источника, построенные в разных элементарных отрезках. Шивание производилось путем взвешивания функций, выбранных



Речевой сигнал (—) и сигнал-остаток голосового источника (---), выведенные из ЭЦВМ БЭСМ-6: а — звук «а» из слова «гамма»; б — звук «е» из слова «бета».

из области F_n компонент ($50 \text{ Гц} \leq F_n \leq 300 \text{ Гц}$, $1 \leq Q \leq 10$ функцией

$$\rho(t) = \sin \frac{\pi t}{T},$$

где t — номер отсчета в отрезке; T — число отсчетов в отрезке

Сигнал-остаток голосового источника, построенный таким способом, отражает основные фазы работы голосовых связок. На графиках, выведенных из ЭЦВМ (рисунок) в местах, соответствующих открытому состоянию связок, наблюдаются явно выраженные импульсы.

Параметры колебаний на трех элементарных отрезках (рисунок, а), следующие: $F_1 = 570, 570, 570 \text{ Гц}$; $F_2 = 1240, 1240, 1240 \text{ Гц}$; $F_3 = 2100, 2100, 2100 \text{ Гц}$; $F_4 = 650, 1610, 1830 \text{ Гц}$; $Q_1 = 11, 20, 20$; $Q_2 = 11, 15, 30$; $Q_3 = 80, 80, 60$; $Q_4 = 20, 8, 11$; $\alpha_1 = 0,95, 0,9, 0,91$; $\alpha_2 = 0,44, 0,045, 0,48$; $\alpha_3 = 0,26, 0,18, 0,26$; $\alpha_4 = 0,18, 0,16, 0,18$.

Проведенные эксперименты позволяют надеяться, что после некоторых усовершенствований можно будет полностью восстановить форму импульсов голосового источника. Представленный

алгоритм синтеза описания речи сохраняет тонкую временную структуру речевого сообщения, разделяет формантные колебания и сигнал-остаток голосового источника.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Махонин В. А.* О психоморфизме в автоматике. М., «Наука», 1971. 127 с.
2. *Вайншток А. П., Махонин В. А., Нарбутис Е. И.* Приемы экономного представления речевого сигнала. — В кн.: Автоматическое распознавание слуховых образов (AFSCO-VI). Таллин, 1972, с. 30—32.
3. Система хранения и обработки речевой информации. — В кн.: Речевое управление. М., 1972, с. 166—175. Авт.: Г. Я. Высоцкий, Е. З. Зиндер, М. В. Кулагин, Н. В. Солин.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Коган А. Б., Ефимов В. Н., Клименко А. В.</i> Динамические процессы в нейронных ансамблях. Сообщение 1. Характеристики отдельного нейрона	3
<i>Зозуля Ю. И.</i> Согласование биологических и технических элементов и систем	12
<i>Борзенко А. Г., Дабагян А. В.</i> Исследование распространения возбуждения в нейронной сети, моделирующей кору мозга	19
<i>Бугай Ю. П., Колесников О. А.</i> Свойства отображения и бионическое моделирование нервной системы. Сообщение 3	24
<i>Осьмуха Г. И.</i> Функциональная устойчивость и самоорганизация полинейронных сетей	29
<i>Дабагян А. А., Ксензенко В. Н.</i> Моделирование на ЦВМ БЭСМ-6 процесса развития и самовоспроизведения организма	40
<i>Ананин В. Ф.</i> Непроизвольные саккадические движения глаз — биологический модулятор информации в зрительном процессе	47
<i>Кацалан С. Ф.</i> Математические модели отображения некоторых видов механического движения	51
<i>Усенко С. А.</i> К вопросу о восприятии шумов слуховым анализатором человека	58
<i>Загускин С. Л., Эм В. С., Загускина Л. Д.</i> Возможный механизм оптимизации энергетики в нервной клетке: функциональная реорганизация митохондрий	61
<i>Колотенко Г. А.</i> Моделирование синхронных и асинхронных потенциалов головного мозга. Сообщение 1	68
<i>Абдула В. Г., Бугай Ю. П., Бахтигозин В. А., Червов В. Г.</i> Оптико-телевизионная модель рецептивных полей зрительного анализатора	76
<i>Нефедов Ю. И.</i> Использование телевизионных систем для пространственно-временной фильтрации изображений. Сообщение 1	78
<i>Нефедов Ю. И., Душин Л. А., Таран В. С.</i> Пространственная фильтрация и ввод в ЭВМ оптических интерферограмм плазмы	85
<i>Поталов В. И., Нестерук В. Ф.</i> Принципы построения ассоциативного вычислительного устройства из формальных нейронов	89
<i>Шапиро С. И.</i> К вопросу о кодировании информации при решении задач с помощью алгоритмов	94
<i>Цепков Г. В.</i> Новый метод автоматической классификации непрерывных временных функций	103
<i>Бондаренко М. Ф., Осыка А. Ф.</i> Об одном алгоритме синтеза числительных русского языка	115
<i>Божко А. Е., Никитин В. А., Григорьева К. В.</i> К оптимальному планированию экспериментов при биологических исследованиях	118
<i>Горбачев В. А., Тевяшев А. Д., Федоров Н. В.</i> Применение методов распознавания образов для выделения промахов в косвенных измерениях	122

<i>Бондаренко М. Ф., Лопухин Ю. В., Осыка А. Ф., Свиляр Н. К.</i> Алгоритм формального спряжения глаголов	130
<i>Чорноштан Э. П.</i> Методика формирования иерархической системы логического выделения характерных параметров описания изображений. Сообщение 2	135
<i>Керемжанов А. Ф.</i> О моделировании некоторых полей, сводящихся к математическим описаниям типа дифференциального уравнения теплопроводности (диффузии)	145
<i>Манешин В. С.</i> Психика, сознание, мышление	150
<i>Кравченко Б. И.</i> Исследование операций и организационный подход к формализации управления в биологических системах	154
<i>Вайншток А. П., Махонин В. А., Сохин Н. В.</i> Описание речи с сохранением тонкой временной структуры сигнала	158

ПРОБЛЕМЫ БИОНИКИ

**Республиканский межведомственный тематический
научно-технический сборник**

Выпуск 14

Редакторы *Л. Ф. Кизилова, А. П. Гужва*
 Обложка художника *И. Ф. Криворучко*
 Технический редактор *Л. Е. Мокроусова*
 Корректоры *Л. А. Федоренко, А. В. Евлахова*

Сдано в набор 8/Х 1974 г. Подписано в печать 20/II 1975 г.
 Формат 60×90^{1/16}. Бумага типографская № 3. Усл. печ. л.
 10,5. Уч.-изд. л. 11,1. Тираж 1000. Заказ 4-2117. БЦ 50044.
 Цена 74 коп.

Издательство издательского объединения «Вища школа» при
 Харьковском государственном университете,
 310003, Харьков, 3, ул. Университетская, 16.

Харьковская книжная фабрика «Коммунист» республиканского
 производственного объединения «Полиграфкнига» Госкомиздата
 УССР. Харьков, ул. Энгельса, 11.

УДК 62. 506. 2

Динамические процессы в нейронных ансамблях. Сообщение 1. Характеристики отдельного нейрона. Коган А. Б., Ефимов В. Н., Клименко А. В. — Сб. «Проблемы бионики», вып. 14, 1975, с. 3—12.

Аналитически описывается импульсная модель неадаптивного нейрона. Приводится вывод эквивалентных передаточных функций входного и выходного звеньев модели в аналоговой форме. Анализируется влияние нелинейности характеристики элемента на его динамические свойства.

Ил. 4. Библиогр. 10.

УДК 62. 506. 2

Согласование биологических и технических элементов и систем. Зозуля Ю. И. Сб. «Проблемы бионики», вып. 14, 1975, с. 12—19.

Рассмотрены условия согласования соотношений «вход-выход» нелинейных динамических систем без памяти и с образной памятью. Дано конструктивное представление для соотношений «вход-выход» согласованных элементов и систем с распределенными ядрами.

Ил. 1. Библиогр. 8.

УДК 62. 506. 001

Исследование распространения возбуждения в нейронной сети, моделирующей кору мозга. Борзенко А. Г., Дабаган А. В. Сб. «Проблемы бионики», вып. 14, 1975, с. 19—23.

Строится математическая модель нейронной сети, состоящей из формальных нейронов, которые обладают рефрактерностью и порогом, аксоны нейронов осуществляют задержку сигнала. Показано, что нанесение коре мозга повреждений не приводит к полной потере информации.

УДК 62. 506. 2

Свойства отображения и бионическое моделирование нервной системы. Сообщение 3. Бугай Ю. П., Колесников О. А. Сб. «Проблемы бионики», вып. 14, 1975, с. 24—29.

Рассмотрен аксиоматический способ задания отношений. Предложено формальное описание отношений посредством введения характеристических функций и операций над ними. Показана возможность проведения сравнительного анализа отношений при помощи простейших арифметических и логических операций. Описаны свойства отношений, существенные для построения бионических моделей.

Библиогр. 5.

УДК 03. 00. 21

Функциональная устойчивость и самоорганизация полинейронных сетей Осмуха Г. И. Сб. «Проблемы бионики», вып. 14, 1975, с. 29—40.

Вводится понятие функциональной устойчивости для нейронной сети. На основе операторов согласования сети с внешним раздражением описывается процесс формирования нейронного ансамбля — функциональной единицы мозга — определенной иерархической сложности.

Ил. 3. Библиогр. 5.

УДК 519. 15

Моделирование на ЦВМ БЭСМ-6 процесса развития и самовоспроизведения организма. *Дабаян А. А., Ксменко В. Н.* Сб. «Проблемы бионики», вып. 14, 1975, с. 40—47.

Описана модель развития и самовоспроизведения организма типа бактериофага. Предусмотрены процессы позитивной и негаивной регуляции на уровне транскрипции. Программа составлена на языке АЛГОЛ.

Ил. 3. Библиогр. 5.

УДК 62. 506. 2

Непроизвольные саккадические движения глаз — биологический модулятор информации в зрительном процессе. *Ананин В. Ф.* Сб. «Проблемы бионики», вып. 14, 1975, с. 47—51.

Рассматривается роль непроизвольных саккадических движений глаз в зрительном процессе. Показано, что саккадические движения играют роль своеобразного биологического модулятора, обеспечивающего получение дискретной информации в зрительных волокнах. Наличие этого вида движения глаз обусловлено необходимостью создания дискретной информации в зрительных волокнах. Это, в свою очередь, дает основание рассматривать саккадические движения глаз как биологический модулятор, индуцируемый специальным центром.

Ил. 1. Библиогр. 9.

УДК 62. 506. 2

Математические модели отображения некоторых видов механического движения. *Кацалап С. Ф.* Сб. «Проблемы бионики», вып. 14, 1975, с. 51—58.

Предлагаются нелинейные дифференциальные операторы, детектирующие различные свойства стимула, движение от равномерного и от прямолинейного движения, вращательное движение. Предложен оператор, измеряющий угловую скорость последнего.

Ил. 2. Библиогр. 3.

УДК 62. 506. 2

К вопросу о восприятии шумов слуховым анализатором человека. *Усенко С. А.* Сб. «Проблемы бионики», вып. 14, 1975, с. 58—61.

Экспериментально исследована зависимость субъективного восприятия шумового сигнала от его частотного спектра. Построена математическая модель, описывающая восприятие человеком полосового шума.

Библиогр. 2.

УДК 612 014. 519. 95

Возможный механизм оптимизации энергетики в нервной клетке: функциональная реорганизация митохондрий. *Зауускин С. Л., Эм В. С., Зауускина Л. Д.* Сб. «Проблемы бионики», вып. 14, 1975, с. 61—67.

Сопоставлены закономерности пространственной реорганизации митохондрий с изменениями дыхания и электрической импульсной активности одиночного нейрона при различных режимах его возбуждения и торможения. Обнаружено, что изменение степени агрегации митохондрий является одним из оперативных механизмов адаптивной регуляции энергетики нейрона. В случае срочной интенсификации энергетики происходит дезагрегация митохондрий. Агрегация митохондрий ограничивает энергетические процессы, оптимизируя их в соответствии с новым функциональным состоянием нейрона.

Ил. 3. Библиогр. 9.

УДК 612.82.014.42.001.57

Моделирование синхронных и асинхронных потенциалов головного мозга. *Сообщение 1.* Колотенко Г. А. Сб. «Проблемы бионики», вып. 14, 1975, с. 68—75.

Рассмотрены некоторые аспекты моделирования и анализа синхронных и асинхронных потенциалов головного мозга. Освещен системный подход к анализу синхронных потенциалов, позволяющий выделить совокупность одномоментных ЭЭГ колебаний, имеющих вероятностную составляющую распределения весов закодированных потенциалов. Тем самым раскрывается возможность выявления динамики рабочих констелляций.

Библиогр. 12.

УДК 62.506.2

Оптико-телевизионная модель рецептивных полей зрительного анализатора. Абдула В. Г., Бугай Ю. П., Бахтигозин В. А., Червов В. Г. Сб. «Проблемы бионики», вып. 14, 1975, с. 80—82.

Рассмотрена комбинированная оптико-телевизионная система для моделирования обработки пространственных изображений рецептивными полями зрительного анализатора человека и животных. Система сочетает в себе возможности оптической и телевизионной моделей рецептивных полей.

Ил. 1. Библиогр. 2.

УДК 621.383.8:681.142.36

Использование телевизионных систем для пространственно-временной фильтрации изображений. *Сообщение 1.* Нефедов Ю. И. Сб. «Проблемы бионики», вып. 14, 1975, с. 82—89.

Установлено, что математические и телевизионные модели детекторов зрительного анализатора позволили определить весовые функции и уточнить функциональные возможности различных пространственно-временных фильтров. Эти данные используются при построении телевизионных фильтров изображений. Сформулирован алгоритм синтеза пространственно-временных фильтров на телевизионных системах. Рассмотрены различные способы реализации данного алгоритма. Показана возможность пространственной фильтрации изображений на экране электроннолучевой трубки. Указано на целесообразность использования телевизионных фильтров при решении задач, связанных с оперативной обработкой изображений.

Ил. 4. Библиогр. 18.

УДК 621.383.8:681.142.36

Пространственная фильтрация и ввод в ЭВМ оптических интерферограмм плазмы. Нефедов Ю. И., Душин Л. А., Таран В. С. Сб. «Проблемы бионики», вып. 14, 1975, с. 89—93.

Указано, что оптические интерферограммы, полученные при исследовании плазмы, целесообразно обрабатывать на ЭВМ. Для повышения эффективности машинной обработки интерферограмм разработано автоматическое телевизионное устройство фильтрации и ввода в ЭВМ изображений интерферограмм. В устройстве фильтрации производится устранение избыточности входной информации путем анизотропного двойного дифференцирования изображения. Устранение избыточности, осуществляемое по аналогии со зрительной системой непосредственно в рецепторном устройстве, приводит к повышению помехоустойчивости и к сокращению времени обработки интерферограмм.

Ил. 2. Библиогр. 6.

УДК 62. 506. 2

Принципы построения ассоциативного вычислительного устройства из формальных нейронов. *Потапов В. И., Нестерук В. Ф.* Сб. «Проблемы бионики», вып. 14, 1975, с. 93—98.

Излагаются основные принципы построения ассоциативных вычислительных устройств с поразрядной обработкой информации из многофункциональных формальных нейронов с переменными весовыми коэффициентами входов и переменным порогом. Оцениваются структурная сложность и эффективность ассоциативного множительного устройства.

Библиогр. 4.

УДК 62. 506. 2

К вопросу о кодировании информации при решении задач с помощью алгоритмов. *Шапиро С. И.* Сб. «Проблемы бионики», вып. 14, 1975, с. 98—106.

Описан эксперимент, проводимый в целях изучения взаимодействия алгоритмических и эвристических составляющих в мышлении человека. Показано, что, в отличие от машинных операторов, умственные действия человека регулируются механизмом «внутреннего» кодирования. Некоторые эвристические методы, к которым прибегает психика в процессе решения задач, описываются с помощью формальных программ. Это открывает путь к моделированию элементов мышления на ЭВМ.

Ил. 2. Библиогр. 3.

УДК 612. 82. 001. 57:51

Новый метод автоматической классификации непрерывных временных функций. *Цепков Г. В.* Сб. «Проблемы бионики», вып. 14, 1975, с. 107—118.

Описан метод разделения на классы динамических и статических образов. Метод основывается на биологической концепции об информативности различных компонент сигнала. Определены способы преобразования сигнала в экономичный время-импульсный код и нормирования кодового описания.

Табл. 1. Ил. 5. Библиогр. 9.

УДК 62. 506. 2

Об одном алгоритме синтеза числительных русского языка. *Бондаренко М. Ф., Осыка А. Ф.* Сб. «Проблемы бионики», вып. 14, 1975, с. 119—122.

Описывается укрупненная блок-схема алгоритма, который синтезирует количественные и порядковые числительные, соответствующие любой цифровой последовательности на входе, в необходимом падеже.

Библиогр. 3.

УДК 62. 506. 2

К оптимальному планированию экспериментов при биологических исследованиях. *Божко А. Е., Никитин В. А., Григорьева К. В.* Сб. «Проблемы бионики», вып. 14, 1975, с. 122—126.

Рассмотрена задача о минимизации числа биологических экспериментов на основе параллельной оценки результатов по предложенной в работе формуле.

Табл. 1. Библиогр. 1.

УДК 62. 506. 001

Применение методов распознавания образов для выделения промахов в косвенных измерениях. *Горбачев В. А., Тевяшев А. Д., Федоров Н. В.* Сб. «Проблемы бионики», вып. 14, 1975, с. 126—134.

С позиций теории распознавания образов рассматривается решение задачи выделения «промахов» при ограниченном числе геодезических измерений. Построение решающей функции основано на критериях решения, используемых человеком.

Табл. 1. Ил. 2. Библиогр. 5.

УДК 62. 506. 2

Алгоритм формального спряжения глаголов. *Бондаренко М. Ф., Лопухин Ю. В. Осыка А. Ф., Свиляр Н. К.* Сб. «Проблемы бионики», вып. 14, 1975, с. 134—139.

Предложен алгоритм формального спряжения глаголов русского языка, который реализует синтез глагольных форм прошедшего времени. Описан математический аппарат для решения словесных задач и изложены особенности их реализации на ЭВМ.

Ил. 2. Библиогр. 2.

УДК 681. 142. 36

Методика формирования системы логического выделения характерных параметров описания изображений. *Сообщение 2. Черноштан Э. П.* Сб. «Проблемы бионики», вып. 14, 1975, с. 139—148.

Рассматривается трансформация локальных признаков контуров линий изображений в горизонтальные, вертикальные и наклонные знаковые признаки при помощи соответствующих функций преобразования.

Табл. 1, Ил. 4. Библиогр. 3.

УДК 62. 506. 2

О моделировании некоторых полей, сводящихся к математическим описаниям типа дифференциального уравнения теплопроводности (диффузии). *Керемжанов А. Ф.* Сб. «Проблемы бионики», вып. 14, 1975, с. 149—154.

Анализируется дифференциальное уравнение теплопроводности (диффузии) как математической модели оперативного семантического сжатия данных на основе бионических аналогий и математической модели зрительного восприятия. Рассматривается проблема статического сжатия и моделирования данных при использовании диффузионных математических моделей.

Библиогр. 6.

УДК 62. 506. 2

Психика, сознание, мышление. *Манешин В. С.* Сб. «Проблемы бионики», вып. 14, 1975, с. 154—158.

Анализируется и сопоставляется содержание понятий «психика», «сознание» «мышление». Раскрываются связь и взаимодействие между этими проявлениями человеческой активности.

Библиогр. 5.

УДК 62. 506. 001. 57:1М9

Исследование операций и организационный подход к формализации управления в биологических системах. *Кравченко Б. И.* Сб. «Проблемы бионики», вып. 14, 1975, с. 158—162.

Рассматривается и методологически обосновывается возможность привлечения метода исследования операций для формализаций феномена самоуправления в биосистемах. Задача решается на основании организационного подхода к математизации биологии как наиболее адекватного пути объяснения специфических особенностей функционирования живого организма.

Библиогр. 7.

УДК 621. 391. 193

Описание речи с сохранением тонкой временной структуры сигнала. *Вайнштук А. П., Махонин В. А., Сошин Н. В.* Сб. «Проблемы бионики», вып. 14, 1975, с. 162—165.

Предложена процедура синтеза описания речи, которая сохраняет тонкую временную структуру речевого сообщения и разделяет формантные колебания и сигнал-остаток голосового источника. Процедура построена по схеме синтеза экономных описаний в неминимальных сигнальных алфавитах и проверена в системе ГРАФ, предназначенной для речевых исследований, на ЭВМ БЭСМ-6.

Ил. 1. Библиогр. 3.