

ДАРСТВЕН.

ПРОБЛЕМЫ



БИОНИКИ

ВЫПУСК

11

73

1973

007.58
1178

ПРОБЛЕМЫ БИОНИКИ

Республиканский межведомственный
тематический научно-технический
сборник

ВЫПУСК 11

8/11

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ХАРЬКОВСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА имени А. М. ГОРЬКОГО
Харьков 1973

Сборник посвящен математическому моделированию преобразования информации в процессе психической деятельности человека. Рассматриваются возможности моделирования однородных биологических систем, даются энергетические оценки силовых взаимодействий как параметров, кодирующих образ. Описываются восприятие и нормализация зрительных картин при изменении яркости и контрастности, при комбинированных преобразованиях изображений. Анализируется речевое поведение человека, исследуются законы отражения человеком числовой информации, предлагается теоретико-информационная модель логических координат. Затрагивается проблема кодирования наследственной информации и формирования физико-математической теории мышления.

Сборник предназначен для научных работников, аспирантов и инженеров — специалистов в области кибернетики, бионики, вычислительной техники и инженерной психологии.

Редакционная коллегия:

чл.-корр. АН СССР Б. С. Сотсков (отв. редактор),
чл.-корр. АМН СССР *Н. М. Амосов*, проф. *Ю. П. Шабанов-Кушнарченко* (зам. отв. редактора), проф. *А. А. Волков*, доц. *Е. П. Пулятин*, канд. биол. наук *К. А. Иванов-Муромский*, канд. техн. наук *М. Ф. Бондаренко* (отв. секретарь), доц. *В. А. Грабина*, канд. техн. наук *В. А. Ловицкий*.

Адрес редакционной коллегии:

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

Ответственный за выпуск *И. Г. Новожилова*.

П $\frac{3314-061}{M226(04)-73}$ 227-73

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАММАТИЧЕСКОЙ КАТЕГОРИИ РОДА ГЛАГОЛОВ РУССКОГО ЯЗЫКА

*Ю. П. Шабанов-Кушнаренко, М. Ф. Бондаренко,
Е. А. Соловьева*

Человек способен определять грамматическую категорию рода глаголов русского языка на основании правил морфологии [1, 2]. Если предложить испытуемому какую-либо форму глагола, то он сможет определить, входит ли эта форма в грамматическую категорию рода, а если входит, то какое именно частное грамматическое значение рода она имеет.

Целью данной работы являлось составление математической модели способности человека определять род глагола. Эта модель получена в виде алгоритма, блок-схема которого приведена на рис. 1.

Множество входных сигналов $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ составляют все глаголы русского языка, входящие в словарь [3], и их формы, представляющие собой одно слово. Множество выходных сигналов $Y = \{y_1, \dots, y_m\}$ в данном случае состоит из четырех элементов. Каждому из выходных сигналов y_1, y_2, y_3 соответствует частное грамматическое значение рода — мужского (y_1), женского (y_2), среднего (y_3), а выходному сигналу y_4 — признак отсутствия рода у глагольной формы. Подавая на вход B алгоритма глагольную форму x_i , в результате работы алгоритма на его выходе \mathcal{G} получаем сигнал-признак y_i : y_1 , если глагол стоит в мужском роде, y_2 — в женском, y_3 — в среднем, y_4 — если глагольная форма не входит в грамматическую категорию рода.

Блок-схема алгоритма включает в себя элементарные блоки (распознаватели и операторы) и составные (блоки 1, 2), которые, в свою очередь, состоят из элементарных. Распознаватель Φ ;

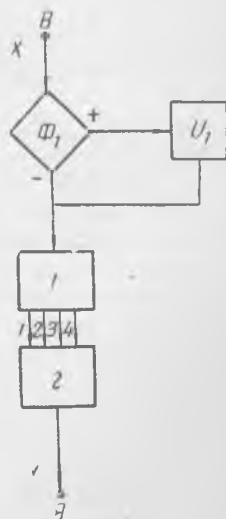


Рис. 1.

проверяет, удовлетворяет ли слово, поданное на его вход, какому-либо условию. В случае выполнения этого условия слово выходит из распознавателя по стрелке, отмеченной знаком плюс, при невыполнении — по стрелке со знаком минус. Распознаватель Φ_1 проверяет две последние буквы слова на «ся» или «сь». Блок U_k , который каким-то образом изменяет поступающий на его вход сигнал, т. е. выполняет над этим сигналом определенную операцию, является оператором. Оператор U_1 отбрасывает две последние буквы поступающего на его вход слова.

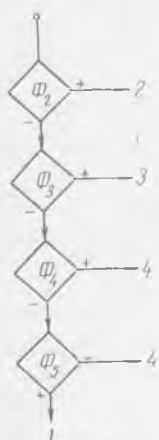


Рис. 2.

Блок 1 является основным блоком алгоритма. Он классифицирует слово (т. е. в данном случае направляет его на один из четырех пронумерованных выходов), основываясь на том, имеет ли оно род, а если имеет, то в зависимости от того, какой именно. Блок 2 формирует выходной сигнал. Рассмотрим подробнее составные блоки 1 (рис. 2) и 2 (рис. 3).

Входящие в состав блока 1 распознаватели выполняют проверку следующих условий: Φ_2 проверяет конец слова на «ла», Φ_3 — на «ло», Φ_4 — на совпадение со словом «ляг», которое является исключением, а Φ_5 — на одну из букв «л», «с», «з», «п», «б», «г», «к», «р», «х».

Блок 1 не изменяет входной сигнал, так как состоит только из распознавателей. Каждая из цифр 1, 2, 3 или 4 на выходе любого блока означает, что этот выход должен быть соединен соответственно с операторами U_2 , U_3 , U_4 или U_5 (они входят в состав блока 2).

Блок 2 представляет собой параллельное соединение операторов замены слова на признак рода y_i : U_2 заменяет слово признаком y_1 , U_3 — признаком y_2 , U_4 — признаком y_3 , U_5 — признаком y_4 .

Входным при решении данной задачи является русский алфавит, расширенный дефисом, так как последний встречается в глаголах повелительного наклонения, оканчивающихся на «-ка».

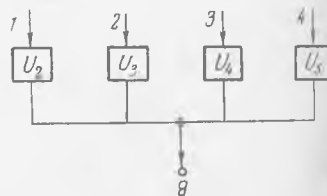


Рис. 3.

Пользуясь классификацией, предложенной в работе [4], можно легко установить, что для нашей конкретной задачи характерно разделение глагольных форм на два типа: а) классифицирующиеся на основании формальных признаков; б) классифицирующиеся при условии известности их лексических значений. Небольшое количество глагольных форм типа б), а также отсутствие глагольных форм типа в) (классифицирующихся только при наличии контекста) в данной задаче определяют сравнительную легкость ее решения. Не случайно что словарь исключений состоит из одного слова, т. е. фактически отсутствует.

На выбранном множестве входных слов алгоритм работает безошибочно. Если же расширить это множество (словами или псевдословами), то погрешность работы алгоритма все равно будет ничтожно мала.

Составленный алгоритм реализован на ЭЦВМ «Минск-22». Полученная программа отлажена на различных массивах глагольных форм. Предложенный алгоритм может найти применение при решении различных задач классификации и представить самостоятельный интерес.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грамматика современного русского литературного языка. М., «Наука», 1970. 767 с.
2. Грамматика русского языка, т. I. М., изд-во АН СССР, 1960. 719 с.
3. Орфографический словарь русского языка, изд. 11-е, М., «Сов. энциклопедия», 1971. 520 с.
4. Бондаренко М. Ф., Соловьева Е. А. Методы решения задач морфологической и субморфологической классификации. Сб. «Проблемы бионики», вып. 10. Изд-во Харьковск. ун-та, 1973, с. 145—149.

НОРМАЛИЗАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЯРКОСТИ И КОНТРАСТНОСТИ

*Е. П. Путятин, Б. К. Лопатченко, В. Б. Левиков,
Б. Я. Сердюченко*

Распознавание человеком зрительных картин обусловлено не абсолютным распределением лучистой яркости зрительной картины, а относительными различиями яркостей отдельных точек картины. В частности, пропорциональное изменение яркости зрительной картины и ее контрастность не влияют в широких пределах на результат узнавания.

Для зрительных картин, заданных в виде функций распределения яркости в поле зрения $B(x, y)$, эти изменения соответствуют преобразованию

$$B(x, y) = kB_0(x, y) + c, \quad (1)$$

где $B_0(x, y)$ — изображение с эталонной яркостью и контрастностью;

k, c — произвольные постоянные.

Нормализовать такие картины — значит построить некоторый оператор $F(B)$, действующий из пространства изображений снова в пространство изображений, и такой, что для каждого изображения из класса эквивалентности, образованного соотношением (1), будет выполняться тождество

$$F[B(x, y)] = B_0(x, y). \quad (2)$$

Число классов эквивалентности равно количеству различных типов изображений.

Построение операторов нормализации при пропорциональном изменении яркости изображения

Примером пропорционального изменения яркости изображения может служить изменение картины отраженной яркости при перемене ее освещенности (если в этом случае коэффициенты отражения всех ее точек остаются прежними). Преобразование функции яркости такой картины описывается соотношением (1), где постоянная $c = 0$.

В данном примере

$$K = \frac{E}{E_0},$$

где E_0 — первоначальная освещенность картины;

E — новое значение освещенности картины.

Рассмотрим процесс нахождения оператора нормализации, приводящего подобные картины к эталонному виду.

Пусть имеются зрительные картины $B(x, y)$ и $B_0(x, y)$. Тогда если

$$B(x, y) = kB_0(x, y), \quad (3)$$

то

$$F[B(x, y)] = F[B_0(x, y)] = B_0(x, y). \quad (3a)$$

Поскольку множество зрительных картин, согласно условию (3), образует группу, то оператор F надо искать в виде

$$F[B(x, y)] = \frac{B_0(x, y)}{\Phi(B)}, \quad (4)$$

где $\Phi(B)$ — произвольный вещественный функционал.

Легко показать, что предложение (3a) справедливо. Чтобы удовлетворялось условие (3a), необходимо и достаточно выполнить для (4) соотношение

$$\Phi(B) = k\Phi(B_0). \quad (5)$$

Действительно, для группы пропорционального изменения яркости условие нормализации (3a) запишется в виде

$$\frac{B(x, y)}{\Phi(B)} = \frac{B_0(x, y)}{\Phi_0(B_0)}.$$

С учетом (3) получаем необходимое условие (5), накладываемое на функционалы $\Phi(B)$ и являющееся достаточным. Условию (5) удовлетворяет любой линейный функционал. Действительно,

$$\frac{\Phi(B)}{\Phi(B_0)} = \frac{\iint_D kB_0(x, y) K(x, y) dx dy}{\iint_D B_0(x, y) K(x, y) dx dy} \equiv k.$$

Функция $K(x, y)$, в частности, может быть тождественно равна единице. Тогда оператор принимает вид

$$F[B(x, y)] = \frac{B(x, y)}{\iint_D B(x, y) dx dy}. \quad (6)$$

Функционалами $\Phi(B)$ могут служить выражения для нормы в соответствующем пространстве. Так, если функции $B(x, y)$ отнести к пространству L_2 , то

$$\Phi(B) = \|B\| = \sqrt{\iint_D [B(x, y)]^2 dx dy}. \quad (7)$$

Оператор в форме (6) фактически содержит выражения для нормы в пространстве суммируемых функций L . Обобщая (6) и (7), записываем

$$\Phi(B) = \sqrt[m]{\iint_D [B(x, y)]^m K(x, y) dx dy}. \quad (8)$$

При этом

$$\frac{\Phi(B)}{\Phi(B_0)} = \sqrt[m]{\frac{\iint_D h^m [B_0(x, y)]^m K(x, y) dx dy}{\iint_D [B_0(x, y)]^m K(x, y) dx dy}} \equiv k,$$

т. е. условие (5) выполняется.

Наконец, в качестве функционалов $\Phi(B)$, удовлетворяющих (5), применимы значения функции $B(x, y)$ в любой точке (x_0, y_0) , так как, по условию (3),

$$B(x_0, y_0) = kB_0(x_0, y_0).$$

Для удобства технической реализации целесообразно выбирать значения $\max B(x, y)$ или $\min B(x, y)$. При этом оператор нормализации будет иметь вид

$$F(B) = \frac{B(x, y)}{\max B(x, y)}$$

либо

$$F(B) = \frac{B(x, y)}{\min B(x, y)}. \quad (9)$$

Нормализация зрительных картин при изменении контрастности

Глаз человека распознает одни и те же зрительные картины, отличающиеся степенью контрастности. Под контрастностью картины β понимается отношение яркостей B самых светлых и самых темных деталей картины, т. е.

$$\beta = \frac{B_{\max}}{B_{\min}}.$$

Контрастность наблюдаемых в природе объектов достигает величин 1000 : 1 и более. Контрастность фотографических изобра-

жений значительно ниже 30:1. Тем не менее при наблюдении таких картин восприятие не затруднено. Человек уверенно распознает картины, контрастность которых меньше 10:1.

Контрастность изображения уменьшается при изменении подсветки внешним источником телевизионного экрана или экрана диапроекции. В этом случае преобразование функций яркости таких картин описывается выражением

$$B(x, y) = B_0(x, y) + c,$$

где c — произвольное число, соответствующее яркости подсветки.

Построим оператор отстройки от фона подсветки, учитывая, что изменение уровня яркости соответствует аддитивной группе.

Пусть заданы зрительные картины $B(x, y)$ и $B_0(x, y)$. При этом справедливо

Утверждение. Если

$$B(x, y) = B_0(x, y) + c,$$

то

$$F[B(x, y)] = F[B_0(x, y)] = B_0(x, y). \quad (10)$$

Оператор $F[B(x, y)]$ ищем в виде

$$S(x, y) = B(x, y) - \Phi(B) + c_0, \quad (11)$$

где $\Phi(B)$ — некоторый вещественный функционал.

Легко доказать

Утверждение. Для выполнения условия (10) необходимо и достаточно, чтобы

$$\Phi(B) - \Phi(B_0) = c. \quad (12)$$

Для линейных функционалов соотношение (12) не имеет места. Действительно,

$$\begin{aligned} L(B) - L(B_0) &= \iint_D [B_0(x, y) + c] K(x, y) dx dy - \\ &- \iint_D B_0(x, y) K(x, y) dx dy = c \iint_D K(x, y) dx dy. \end{aligned}$$

Анализируя это выражение, заключаем, что в качестве функционалов $\Phi(B)$ нужно выбирать

$$\Phi(B) = \frac{\iint_D B(x, y) K(x, y) dx dy}{\iint_D K(x, y) dx dy}. \quad (13)$$

Функция $K(x, y)$ может приниматься тождественно равной единице. Тогда выражение в знаменателе физически означает площадь поля зрения.

Оператор нормализации принимает вид

$$F[B(x, y)] = B(x, y) - \frac{\iint_D B(x, y) dx dy}{\iint_D dx dy} + c_0. \quad (14)$$

В качестве функционалов $\Phi(B)$, удовлетворяющих соотношению (12), очевидно, можно выбрать яркость отдельной точки. Для произвольной точки (x_0, y_0) зрительной картины, согласно условию (10), выполняется соотношение

$$B(x_0, y_0) - B_0(x_0, y_0) = c. \quad (15)$$

Оператор отстройки от фона в этом случае будет иметь наиболее простой вид

$$F[B(x, y)] = B(x, y) - B_0(x_0, y_0) + c_0. \quad (16)$$

Константу c_0 следует выбирать из условия $\min F[B(x, y)] \geq 0$, так как яркость не может быть отрицательной.

При этом

$$\begin{aligned} \min F[B(x, y)] &= \min [B(x, y) + c_0 - \Phi(B)] = \\ &= \min B(x, y) + c_0 - \Phi(B) \geq 0, \end{aligned}$$

т. е.

$$c_0 \geq \Phi(B) - \min B(x, y). \quad (17)$$

Величину $\Phi(B)$ оцениваем следующим образом:

$$\begin{aligned} \Phi(B) &= \frac{\iint_D B(x, y) K(x, y) dx dy}{\iint_D K(x, y) dx dy} \leq \frac{\iint_D \max B(x, y) K(x, y) dx dy}{\iint_D K(x, y) dx dy} = \\ &= \max B(x, y). \end{aligned}$$

Поэтому достаточно $c_0 \geq \max B(x, y) - \min B(x, y) = \delta B$, чтобы условие (17) выполнялось, каким бы ни было ядро функционала $K(x, y)$. Очевидно, что δB — величина, инвариантная изменению уровня яркости изображения. Для изображений одного класса δB постоянна, для изображений же различных классов она может меняться. Поэтому c_0 надо выбирать так, чтобы

$$c_0 \geq \max \delta B, \quad (18)$$

где $\max \delta B$ — наибольшее из значений δB для рассматриваемых классов эквивалентных изображений.

Нормализация изображений при одновременном изменении уровня яркости и контрастности

В практике чаще всего встречаются комбинированные преобразования картин, где одновременно изменяются и уровень яркости, и контрастность изображения. В этом случае произвольное и эталонное изображения связаны соотношением

$$B(x, y) = kB_0(x, y) + c, \quad k \neq 0.$$

Преобразования такого вида образуют группу. В самом деле, последовательно применяя к изображению $B_0(x, y)$ два преобразования с параметрами (k_1c_1) и (k_2c_2) , получаем

$$k_2[k_1B_0(x, y) + c_1] + c_2 = k_2k_1B_0(x, y) + k_2c_1 + c_2,$$

что равносильно использованию одного преобразования с параметрами $(k_2 k_1, k_2 c_1 + c_2)$, т. е. $\begin{pmatrix} k_2 \\ c_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_1 \\ c_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_2 k_1 \\ k_2 c_1 + c_2 \end{pmatrix}$.

При этом выполняется требование ассоциативности

$$\begin{pmatrix} k_3 \\ c_3 \end{pmatrix} \left[\begin{pmatrix} k_2 \\ c_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_1 \\ c_1 \end{pmatrix} \right] = \left[\begin{pmatrix} k_3 \\ c_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_2 \\ c_2 \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} k_1 \\ c_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_3 k_2 k_1 \\ k_3 k_2 c_1 + k_3 c_2 + c_3 \end{pmatrix}.$$

Единичное (тождественное) преобразование также определено и имеет параметры $k = 1, c = 0$. Для каждого преобразования с параметрами (k, c) существует обратное с параметрами

$$\left(\frac{1}{k}; -\frac{c}{k} \right).$$

Сказанное выше позволяет искать оператор нормализации в виде

$$F[B(x, y)] = \frac{B(x, y) - \Phi_1(B)}{\Phi_2(B)}, \quad (19)$$

где функционалы $\Phi_1(B)$ и $\Phi_2(B)$ должны удовлетворять необходимым и достаточным условиям

$$\Phi_1(B) = k\Phi_1(B_0) - c;$$

$$\Phi_2(B) = k\Phi_2(B_0). \quad (20)$$

Функционал $\Phi_2(B)$ ищем в виде разности двух функционалов $\Phi_2'(B)$ и $\Phi_2''(B)$, каждый из которых удовлетворяет условиям

$$\Phi_2'(B) = k\Phi_2'(B_0) - c;$$

$$\Phi_2''(B) = k\Phi_2''(B_0) - c. \quad (21)$$

При этом один из указанных функционалов может совпадать с $\Phi_1(B)$.

Нетрудно убедиться, что в качестве функционалов $\Phi_1(B) = \Phi_2'(B)$ и $\Phi_2(B) = \Phi_2''(B)$ могут быть выбраны

$$\Phi_2'(B) = \frac{\iint_D B(x, y) \varphi_1(x, y) dx dy}{\iint_D \varphi_1(x, y) dx dy}; \quad \Phi_2''(B) = \frac{\iint_D B(x, y) \varphi_2(x, y) dx dy}{\iint_D \varphi_2(x, y) dx dy}, \quad (22)$$

где $\varphi_1(x, y)$ и $\varphi_2(x, y)$ — некоторые линейно независимые функции. Функционалы

$$\Phi_2'(B) = \max B(x, y); \quad \Phi_2''(B) = \min B(x, y) \quad (23)$$

также удовлетворяют необходимым и достаточным условиям (21).

Техническая реализация алгоритмов нормализации

Алгоритмы (6), (9) широко используются в телевизионных автоматах, например в целях поддержания на фотослое передающей трубки постоянной освещенности или для автоматического регулирования режима работы трубки.

Оператор (14) можно реализовать согласно схеме, представленной на рис. 1. Схема содержит передающую камеру 1, фотоприемник (например, ФЭУ) 2, видеоусилитель 3, аналоговые вычитающие устройства 4 и 5, блок формирования стандартного телевизионного сигнала 6, видеоконтрольное устройство 7.

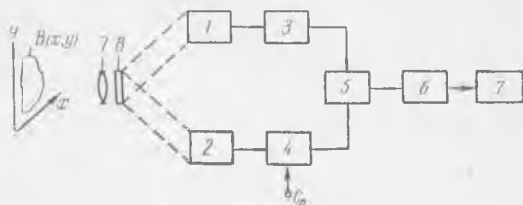


Рис. 1.

Изображение, характеризующееся лучистой яркостью $B(x, y)$, представляется в поле зрения объектива 8 и одновременно посредством светоделительного устройства 9 проектируется на светочувствительные входы передающей трубки 1 и фотоприемника 2.

При этом на выходе видеоусилителя 3 возникает последовательность видеоимпульсов $U(t)$, соответствующих лучистой яркости $B(x, y)$ изображения объекта. В случае линейности световых характеристик передающей трубки

$$B(x, y) + c \sim U(t) + U_0,$$

где c — уровень фона подсветки;

U_0 — уровень постоянной составляющей видеосигнала, соответствующий уровню подсветки.

На выходе фотоприемника 2 возникает сигнал постоянного тока, численно равный интегральной яркости нормализуемой картины:

$$U \sim \alpha \iint_D B(x, y) dx dy.$$

При этом коэффициент пропорциональности α может быть всегда подобран таким образом, что его величина

$$\alpha = \frac{1}{\iint_D dx dy}.$$

Сигнал с выхода фотоприемника 2 поступает на вход вычитающего устройства 4. Здесь из него вычитается постоянное напряжение, соответствующее величине c_0 , которая выбирается для данного класса картин из условия (18). В вычитающем блоке 5, на входы которого подключены выходы видеоусилителя 3 и блока 4, происходит окончательное преобразование, соответ-

ствующее (14). В результате параметры функции, описывающей изображение объекта, остаются постоянными на экране видеоконтрольного устройства 7 при изменении уровня подсветки изображения.

Рассмотрим методы технической реализации алгоритма (19). Блок-схема устройства нормализации изображения представлена на рис. 2. Устройство имеет передающую телевизионную камеру 1, фотоприемники 2, 3 с оптическими фильтрами 4 и 5, видеоусилитель 6, потенциометрические делители 7, 8, аналоговые вычитающие устройства 9, 10, делительное устройство 11, блок формирования стандартного телевизионного сигнала 12, видеоконтрольное устройство 13.



Рис. 2.

Изображение $B(x, y)$ с помощью объектива 14 и светоделительного устройства 15 проектируется на светочувствительные входы фотоприемников 2, 3 через оптические фильтры 4, 5 и непосредственно на светочувствительный вход передающей камеры 1.

Сигнал на выходе фотоприемника 2 пропорционален

$$\alpha \iint_D B(x, y) \varphi_1(x, y) dx dy,$$

где $\varphi_1(x, y)$ — характеристика закона распределения оптической плотности пространственного фильтра 4;

α — коэффициент пропорциональности, подбираемый таким образом, что $\alpha = \frac{1}{\iint_D \varphi_1(x, y) dx dy}$.

Последнее достигается надлежащим выбором коэффициента деления потенциометрической схемы 7. Таким образом, на выходе блока 7 получается численное значение функционала $\Phi_2(B)$, а на выходе блока 8 — значение функционала $\Phi_2''(B)$. Вычитающее устройство 10 определяет разность этих функционалов. Назначение блока 9 (рис. 2) и блоков 4, 5 (рис. 1) аналогично.

Окончательно алгоритм (19) реализуется в аналоговом делительном устройстве 11. Блок 12 формирует стандартный телевизионный сигнал. Последний, поступая на вход видеоконтрольного устройства 13, вызывает появление изображения, параметры кото-

рого остаются постоянными независимо от яркостных преобразований исходного изображения.

Описанные устройства упрощают сравнение картин с эталонами и могут использоваться для распознавания образов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Путятин Е. П., Шульгин И. В., Юрченко В. П., Абрамов О. М. К вопросу о моделировании механизмов нормализации зрительных образов. Сб. «Проблемы бионики», вып. 5. Изд-во Харьковск. ун-та, 1971, с. 102—106.

2. Путятин Е. П., Шульгин И. В., Юрченко В. П. Построение инвариантов смещения и поворота зрительных картин. Сб. «Биологическая, медицинская кибернетика и бионика», вып. 3. Ин-т кибернетики АН УССР, Киев, 1970, с. 51—64.

3. Путятин Е. П., Левиков В. Б. Нормализация изображений при аффинных преобразованиях. Сб. «Проблемы бионики», вып. 8. Изд-во Харьковск. ун-та, 1972, с. 44—52.

4. Ковалевский В. А. Корреляционный метод распознавания изображений. Ж. выч. матем. и матем. физ., 1962, т. 2, № 4, с. 120—126.

МОДЕЛИ ЦВЕТОВЫХ РЕЦЕПТИВНЫХ ПОЛЕЙ СЕТЧАТКИ СУСЛИКА

Ю. А. Куманин, Ю. И. Зозуля, В. Г. Червов

Изучение цветового зрения — одно из направлений в исследованиях зрительного восприятия. Установлено, что сетчатка глаза выделяет спектральные характеристики света и генерирует определенный вид сигналов, несущих закодированную информацию о цвете. Эти сигналы преобразуются подкорковыми нервными центрами, в частности наружным коленчатым телом, и поступают в цветоощущающие центры коры головного мозга. В коре сигналы, определенным образом взаимодействуя между собой, вызывают такие изменения метаболических процессов в клетках цветоощущающих центров, которые соответствуют ощущению определенного цвета. Это ощущение качественно характеризует воспринимаемые глазом физические параметры световых сигналов. Таким образом, цвет как реальная объективная характеристика окружающего мира воспринимается субъективно. Поэтому один и тот же световой стимул может восприниматься по-разному в зависимости от окружающих условий, эмоционального состояния и других факторов, влияющих на цветоощущение. Это значит, что цветовое зрение нельзя представлять только в виде простого процесса обработки световых сигналов.

Представления об обработке цвета в сетчатке глаза

В сетчатке глаза роль аппарата, который производит спектральный анализ света, падающего на рецепторы, выполняет совокупность приемников. Каждому приемнику соответствует отдельный фотопигмент.

Зрительные пигменты представляют собой сложные окрашенные белки — хромопротеиды, состоящие из белковой части, или опсина, и связанного с ним ретиналя, или альдегида витамина А. Поскольку существует по два вида ретиналя и опсинов (один — палочковый, другой — колбочковый), спектральная характеристика зрительных пигментов определяется как хромофором и опсином, так и, возможно, характером связей между ними.

Попадая в сетчатку, лучи света возбуждают фоторецепторы, которые генерируют рецепторный потенциал. Природа самого рецепторного потенциала и сложных процессов, происходящих в фоторецепторе, пока не ясна [1].

Горизонтальные клетки непосредственно связаны с фоторецепторами, имеющими разную спектральную чувствительность, но их роль в обработке и кодировании сигналов о цвете пока не выяснена. Биполярные клетки связывают фоторецепторы с ганглиозными клетками и определяют их рецептивные поля. О функциональных свойствах акмариновых клеток известно немного. Их связи с биполярными и ганглиозными клетками, а также с корой головного мозга позволяют предположить, что они активно участвуют в обработке информации о цвете.

Математические описания процессов восприятия цвета различны [2—4]. В последнее время получила распространение нелинейная теория, предполагающая нелинейное взаимоотношение между стимулом и реакцией на всех уровнях нервных взаимодействий [5, 6].

На основании результатов этих работ лишь в первом приближении можно описать реакции различных слоев сетчатки на цветовую составляющую света.

Входными сигналами зрительного анализатора являются спектральная плотность освещенности сетчатки глаза $F_e(x, t, \lambda)$ или спектральная плотность мощности электромагнитной энергии света $W_e(x, t, \lambda)$, падающего на рецепторы глаза животного:

$$F_e = \frac{\partial^3 W_e(x, t, \lambda)}{\partial s \partial t \partial \lambda}, \quad (1)$$

где $x = x_1, x_2, x_3$ — координаты слоя наружных сегментов рецепторов;

∂s — площадь элементарного участка сетчатки;

λ — длина волны падающего света.

Процессы в отдельном рецепторе чрезвычайно сложны. В первом приближении наружный сегмент, соединенный с сомой рецептора узким каналом, может быть представлен эквивалентным не-синаптическим источником. В непрерывной модели этот источник имеет вид функции

$$I_i(\vec{x}, t) = \ln \left[1 + \int_0^{\infty} f_i(\lambda) F_e(\vec{x}, t, \lambda) d\lambda \right], \quad (2)$$

где $f_i(\lambda)$ — спектральная чувствительность i -го приемника;
 i — индекс приемника с максимумом чувствительности при $\lambda = \lambda_i$; $i = 1, 2, \dots, n$.

Высокая плотность связей между отдельными нейронами, а также значительное перекрытие рецептивных полей позволяют представить дискретные нейронные сети как непрерывные нейронные среды. Подпороговую реакцию j -го слоя нейронной среды на входное возмущение $I_i(\vec{x}, t)$ можно найти в виде интегрального преобразования [7; 8]

$$P_j(\vec{x}, t) = \sum_{i=1}^n \iiint_{R^3-\infty} \int_0^t G_{ji}(\vec{x}, \vec{x}', t, t') I_i(\vec{x}, t) dt' d\vec{x}', \quad (3)$$

где $G_{ji}(\vec{x}, \vec{x}', t, t')$ — функция влияния i -го приемника на j -й слой нейронной сети, характеризующая связи между рецепторами и нейронами j -го слоя сети.

После подстановки (2) в (3) получаем

$$P_{ji}(\vec{x}, t) = \sum_{i=1}^n \iiint_{R^3-\infty} \int_0^t G_{ji}(\vec{x}, \vec{x}', t, t') \ln \left[1 + \int_0^{\infty} f_i(\lambda) F_e(\vec{x}', t', \lambda) d\lambda \right] dt' d\vec{x}'. \quad (4)$$

На начальном участке логарифмической характеристики имеем

$$\begin{aligned} P_{ji}(\vec{x}, t) &= \sum_{i=1}^n \int_0^{\infty} \iiint_{R^3-\infty} \int_0^t G_{ji}(\vec{x}, \vec{x}', t, t') f_i(\lambda) F_e(\vec{x}', t', \lambda) dt' d\vec{x}' d\lambda = \\ &= \int_0^{\infty} \iiint_{R^3-\infty} \int_0^t G_j(\vec{x}, \vec{x}', t, t', \lambda) F_e(\lambda, t', \vec{x}') dt' d\vec{x}' d\lambda, \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$G_j(\vec{x}, \vec{x}', t, t', \lambda) = \sum_{i=1}^n G_{ji}(\vec{x}, \vec{x}', t, t') f_i(\lambda) \quad (6)$$

— функция влияния j -го слоя нейронной сети на начальном участке статической характеристики рецептора. Уравнения (4), (5) могут использоваться для изучения передачи цветовой информации по нейронной сети.

При исследовании квазистатических свойств рецептивных полей зрительного анализатора [8, 9] для однородного плоского участка нейронной сети уравнение (5) переписывается в более простом виде [7]:

$$P_j(x_1, x_2) = \int_0^{\infty} \int_{R^2} G_j(x_1 - x'_1, x_2 - x'_2, \lambda) F_e(x'_1, x'_2, \lambda) dx'_1 dx'_2 d\lambda. \quad (7)$$

При $P_j > 0$ нервная клетка дает оп-реакцию, а при $P_j < 0$ — off-реакцию.

Для упрощения аналитических операций вместо (7) можно использовать выражение

$$P_j(x_1, x_2) = \iiint_{R^3} G_j(x_1 - x'_1, x_2 - x'_2, \lambda) F_e(x'_1, x'_2, \lambda) dx'_1 dx'_2 d\lambda, \quad (8)$$

хотя физический смысл в отрицательных длинах волн отсутствует.

Классификация рецептивных полей сетчатки суслика

Фоторецепторный слой сетчатки суслика [10—13] состоит исключительно из колбочек. Из 410 изученных волокон зрительного нерва 99 (т. е. 24%) несут противоположную по цвету информацию.

Одна группа волокон (49%) возбуждается длиной волны, соответствующей зеленому цвету с $\lambda_{\max} = 525$ нм, а более короткие волны, соответствующие синему цвету с $\lambda_{\max} = 460$ нм, оказывают сильное тормозное влияние.

Другая группа волокон (51%) возбуждается синим цветом и тормозится зеленым. Наличие красно-зеленых, противоположных по цвету волокон не доказано.

По своему строению и функциональному назначению противоположные по цвету волокна разделены на три класса.

Рецептивные поля класса I состоят из круговых областей диаметром 2—3° (1° зрительного угла соответствует 115 мк на сетчатке суслика); оп- или off-ответы вызываются в любом участке этой области.

Антагонистического окружения нет. Около половины данных элементов имеют зеленые оп- или синие off-волокна, а другие — зеленые off- и синие оп-волокна.

Рецептивные поля элементов класса II включают в себя центр и окружение противоположного оп- или off-типа. Центры полей имеют 1—4,5° в диаметре, а полный размер рецептивных полей равен 5—15°.

Чувствительные к зеленому свету колбочки локализованы только в центре рецептивного поля, в то время как чувствительные к синему свету распределены по всему полю. Внутри центра рецептивного поля всех волокон класса II зеленая компонента реакции всегда намного чувствительнее синей.

Рецептивные поля класса III отличаются от элементов класса II тем, что в центре поля наблюдается чувствительность только к зеленому свету. Таким образом, перекрытие пространственных распределений оп- и off-областей рецептивного поля отсутствует.

Кроме противоположных по цвету элементов, в сетчатке суслика имеются чувствительные к контрасту элементы, составляющие класс IV рецептивных полей. Кривые спектральной чувствительности для центра и периферии параллельны и имеют одну и ту же величину $\lambda_{\max} = 525 \text{ нм}$.

Следовательно, и центр, и периферия получают информацию только от чувствительных к зеленому цвету колбочек.

Волокна класса V выделяют направление движения пятен различного спектрального состава. Они представляют собой высокоспециализированные клетки.

В данной работе рассматриваются только элементы классов I—IV.

Математическое описание рецептивных полей

Для построения математической модели рецептивных полей сетчатки глаза суслика на основании экспериментальных данных необходимо описать функции влияния каждого класса рецептивных полей (табл. 1) в виде

$$G_j(x_1 - x'_1, x_2 - x'_2, \lambda) = f_1(\lambda) G_{j1}(x_1 - x'_1, x_2 - x'_2, \lambda) + f_2(\lambda) G_{j2}(x_1 - x'_1, x_2 - x'_2, \lambda), \quad (9)$$

где $f_1(\lambda)$, $f_2(\lambda)$ — функции спектральной чувствительности колбочек с $\lambda_{1\max} = 460 \text{ нм}$ и $\lambda_{2\max} = 525 \text{ нм}$ соответственно; G_{j1} , G_{j2} — функции, характеризующие пространственное распределение между двумя видами колбочек и j -м классом ганглиозных клеток сетчатки (заштрихованная область в табл. 1 представляет собой синюю компоненту).

При $G(a, b) > 0$ между рецептором, имеющим координаты x_1, x_2 , и ганглиозной клеткой с координатами $x_1 = x_1 + a$ и $x_2 = x_2 + a$ существует такая связь, что при освещении рецептора вызывается оп-реакция ганглиозной клетки. При $G(a, b) < 0$ возникает off-реакция.

Функции спектральной чувствительности и пространственные переходные функции рецептивных полей [10, 12] в результате анализа их графиков аппроксимируются следующим образом:

$$f_1(\lambda) = \frac{\alpha_1}{V\pi} e^{-\frac{\alpha_1^2(\lambda - \lambda_{1\max})^2}{V\pi}}; \quad f_2(\lambda) = \frac{\alpha_2}{V\pi} e^{-\frac{\alpha_2^2(\lambda - \lambda_{2\max})^2}{V\pi}};$$

$$G_{j1}(x_1, x_2) = A\gamma_{j1} e^{-\beta_{j1}^2(x_1^2 + x_2^2)} \quad (10)$$

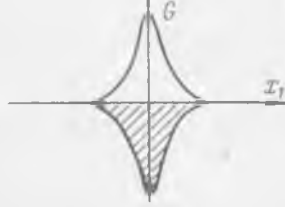
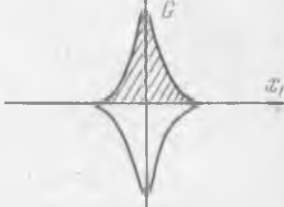
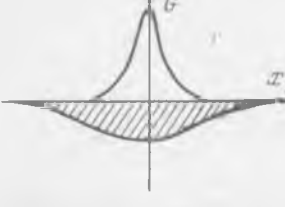
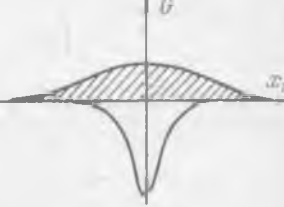
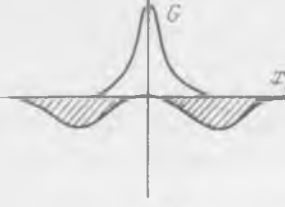
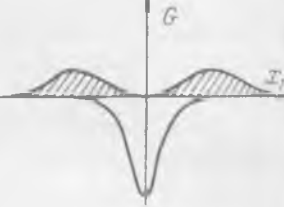
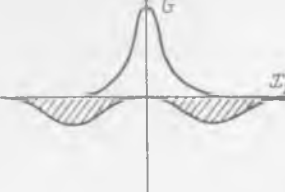
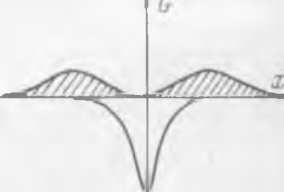
$$G_{j2}(x_1, x_2) = -A\gamma_{j2} \left[e^{-\beta_{j2}^2(x_1^2 + x_2^2)} - a_j e^{-\beta_{j1}^2(x_1^2 + x_2^2)} \right],$$

где α_1, α_2 — константы, определяющие скорость спада кривых спектральной чувствительности соответственно к синему и зеленому свету;

β_{j1}, β_{j2} — константы, определяющие размеры центра (β_{j1}) и периферии (β_{j2}) рецептивного поля;

γ_{j1}, γ_{j2} — величины, характеризующие соотношение между ам-

Таблица 1

Класс рецептивного поля	$A = 1$	$A = -1$
I		
II		
III		
IV		

плитудами оп- и off-реакций в центре (γ_{j1}) и на периферии (γ_{j2}) рецептивного поля.

При $A = 1$ рецептивное поле имеет оп-центр и off-периферию, а при $A = -1$ — наоборот; $a_j < 1$ указывает на малую величину синей компоненты центральной реакции по сравнению с зеленой для рецептивных полей класса II. Для остальных классов рецептивных полей $a_j = 1$.

Таблица 2

Класс рецептивного поля	$m_1 = m_2$	$m_1 > m_2$
		$1 - \lambda_1 = \lambda_{1m}, \lambda_2 = \lambda_{cp}$ $2 - \lambda_1 = \lambda_{cp}, \lambda_2 = \lambda_{2m}$ $3 - \lambda_1 = \lambda_{1m}, \lambda_2 = \lambda_{2m}$ $4 - \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_{cp}$
I		
II		
III		
IV		

Определим реакцию системы на границу между цветовыми монохроматическими полями с интенсивностью m_1 и m_2 и длин волн λ_1 и λ_2 :

$$I(x_1, x_2, \lambda) = m_1 1(x_1) \delta(\lambda - \lambda_1) + m_2 1(-x_1) \delta(\lambda - \lambda_2). \quad (11)$$

Подставляя в (8) значения (9)–(11), после ряда промежуточных преобразований получаем реакцию системы рецептивных полей сетчатки суслика:

$$\begin{aligned} P_j(x_1, x_2) = & Am_1 \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left\{ [\operatorname{erf}(\beta_{j1} x_1) + 1] \frac{\alpha_1 \gamma_{j1}}{\beta_{j1}^2} e^{-\frac{\alpha_1^2}{2}(\lambda_1 - \lambda_{1\max})^2} - \right. \\ & - [\operatorname{erf}(\beta_{j2} x_1) + 1] \frac{\alpha_2 \gamma_{j2}}{\beta_{j2}^2} e^{-\frac{\alpha_2^2}{2}(\lambda_1 - \lambda_{2\max})^2} + \operatorname{erf}(\beta_{j1} x_1) + \\ & \left. + 1 \right\} \frac{\alpha_2 \gamma_{j2}}{\beta_{j1}^2} a_j e^{-\frac{\alpha_2^2}{2}(\lambda_1 - \lambda_{2\max})^2} + Am_2 \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left\{ [1 - \operatorname{erf}(\beta_{j1} x_1)] \times \right. \\ & \times \frac{\alpha_1 \gamma_{j1}}{\beta_{j1}^2} e^{-\frac{\alpha_1^2}{2}(\lambda_2 - \lambda_{1\max})^2} - \frac{\alpha_2 \gamma_{j2}}{\beta_{j2}^2} [1 - \operatorname{erf}(\beta_{j2} x_1)] e^{-\frac{\alpha_2^2}{2}(\lambda_2 - \lambda_{2\max})^2} + \\ & \left. + \frac{\alpha_2 \gamma_{j2}}{\beta_{j1}^2} a_j [1 - \operatorname{erf}(\beta_{j1} x_1)] e^{-\frac{\alpha_2^2}{2}(\lambda_2 - \lambda_{2\max})^2} \right\}. \quad (12) \end{aligned}$$

Исходя из общего вида реакции и параметров, характеризующих каждый класс рецептивных полей, для каждого класса полей находим реакции на входной стимул при различных значениях его параметров (табл. 2).

ВЫВОДЫ

1. Рецептивные поля класса I реагируют на цветовую составляющую света и лишь незначительно подчеркивают разность освещенности.

2. Поля класса III отвечают на цветовой контраст. Реакция на цветовую составляющую у этих элементов слабее, чем в классе I.

3. Рецептивные поля класса II по своей структуре занимают промежуточное положение между полями классов I и III. Они реагируют на цветовую составляющую света и подчеркивают контраст в освещенности, т. е. сочетают свойства элементов классов I и III.

4. Элементы класса IV реагируют лишь на общий контраст в освещенности с максимумом реакции при освещении рецептивного поля зеленым светом.

5. Синечувствительные рецепторы расположены на большей площади, чем зеленые, что согласуется с выводами относительно размеров цветовых полей [6].

6. Можно предположить, что для суслика важное значение имеет зеленый свет, а синий играет лишь вспомогательную роль, служит фоном.

Сетчатка суслика по своему строению подобна сетчатке, у которой отсутствуют красочувствительные колбочки, однако цветоощущение человека нельзя сравнивать с восприятием цвета сусликом, так как функции высших нервных центров суслика еще неизвестны.

7. Противоположные цвета передаются в виде оп- или off-реакций. У одних элементов ($A = -1$) синий цвет передается при включении светового стимула, а зеленый — при его выключении. У других элементов ($A = 1$) наблюдается обратное. Можно предположить, что эти две группы противоположных цветовых рецептивных полей так же специфически взаимодействуют в высших центрах зрительного анализатора, как и аналогичные поля в зрительном анализаторе обезьяны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tomita T. Electrical activity of vertebrate photoreceptors. «Quarterly reviews of Biophysics», 3, 2(1970), p. 941—961.
- 2) 2. Jameson D., Hurvich L. Some quantitative aspects of an opponent color theory, I. Chromatic responses and spectral saturation. JOSA, n 45(1955).
3. Шабанов-Кушнаренко Ю. П. Математическое моделирование некоторых функций человеческого зрения. Автореф. докт. дисс., Харьков, 1968. 37 с.
4. Шабанов-Кушнаренко Ю. П., Путятин Е. П. Математическая модель цветового зрения человека. Материалы XXI Всесоюзной научной сессии, посвященной 70-летию изобретения радио (секция бионики). М., изд. науч.-техн. О-ва радио и электроники, 1965, с. 31—33.
5. Meessen A. A simple non-linear theory of color perception and contrast effects. «Kybernetik», 1967, Bd. 4, n. 2, z. 48—54.
6. Meessen A. Structural model of the retina relating the observed trichromatic and opponent-color responses. JOSA, 58, 1968, Bd, 4, n. 3, p. 209—223.
7. Зозуля Ю. И., Червов В. Г., Бугай Ю. П. Непрерывная математическая модель нейронной сети. Сб. «Проблемы бионики» вып. 8. Изд-во Харьковск. ун-та, 1970, с. 93—102.
8. Wiesel T., Hubel D. Spatial and chromatic interaction in the lateral geniculate Body of the rhesus monkey. «J. Neurophysiol.», 24, 1966, p. 1115—1156.
9. Зозуля Ю. И., Червов В. Г., Бугай Ю. П. Математические модели простых рецептивных полей зрительной коры. Сб. «Проблемы бионики», вып. 7. Изд-во Харьковск. ун-та, 1971, с. 48—53.
10. Michael C. Receptive fields of single optic nerve fibers in a mammal with an all-cone retina, I. Contrast-sensitive units. «J. Neurophysiol.», 31 (1968).
11. Michael C. Receptive fields of single optic nerve fibers in mammal with an all-cone retina, II. Directionally selective units. «J. Neurophysiol.», 31, 1968, p. 243—256.
12. Michael C. Receptive fields of single optic nerve fibers in a mammal with an all-cone retina, III. Opponent color units. «J. Neurophysiol.», 11, 1968, 256—268.
13. Jacobs G., Yolton R. Visual sensitivity and color vision in ground squirrels. «Vission Res.», vol. 11, № 6, p. 511—537.

МИНИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ В ФУНКЦИОНАЛЬНО УСТОЙЧИВЫХ ЛОГИЧЕСКИХ СЕТЯХ ИЗ ЭЛЕМЕНТОВ НЕЙРОННОГО ТИПА

В. И. Потанов, В. Ф. Нестерук

В процессе исследований надежности восстанавливаемых функционально устойчивых логических сетей из элементов нейронного типа — формальных нейронов (ФН) [1, 2] — не рассматривался механизм сокращения процесса восстановления заданной выходной функции $F_k(x_1, x_2, \dots, x_\delta)$ сети при наличии у ФН отказов вида $(1 \rightarrow 0)$ и $(0 \rightarrow 1)$. В связи с разработкой практических схем реализации ФН с кодовой перестройкой логики [3, 4] вследствие изменения весовых коэффициентов и порога процесс индивидуальной настройки ФН для восстановления функций логической сети значительно упростился. Есть основания полагать, что восстанавливаемые функционально устойчивые сети из подобных ФН могут использоваться для построения высоконадежных одноранговых вычислительных структур.

В связи с этим возникает задача о минимизации процесса восстановления заданной функции F_k на выходе сети ФН, т. е. проблема минимизации числа перестроек ФН, а следовательно и времени восстановления сети. Решению указанной задачи для регулярных двухранговых сетей с δ нейронами в первом ранге и одним ФН во втором ранге [5] посвящена настоящая работа.

Состояние рассматриваемой сети из нейроноподобных элементов в любой дискретный момент времени описывается матрицей

$$A = \begin{vmatrix} x_{11}x_{12} \dots x_{1\delta} \\ x_{21}x_{22} \dots x_{2\delta} \\ \dots \\ x_{\delta 1}x_{\delta 2} \dots x_{\delta\delta} \end{vmatrix}$$

и матрицей-столбцом

$$B = \begin{vmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_\delta \end{vmatrix},$$

элементы которых связаны функциональной зависимостью

$$y_i = \psi_i^k(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{i\delta}), \\ i = 1, 2, \dots, \delta; k \in \{0, 1, \dots, 2^{2^\delta} - 1\}.$$

При этом реализуемая сетью ФН функция F_k определяется выражением

$$F_k = \varphi^r[\psi_1^l(x_{1j}), \psi_2^m(x_{2j}), \dots, \psi_\delta^p(x_{\delta j})], \\ j = 1, 2, \dots, \delta; k, l, m, p, r \in \{0, 1, \dots, 2^{2^\delta} - 1\}.$$

В приведенных обозначениях $x_{ij} \in \{0, 1\}$; j — входная переменная, подаваемая на i -й ФН первого ранга сети; $y_i \in \{0, 1\}$ — значение функции ψ_i , реализуемой ФН первого ранга сети; φ — функция, реализуемая выходным ФН сети; k, l, m, p, r — номера функций, реализуемых ФН сети.

Очевидно, что каждая совокупность L_q функций $\psi_1^l, \psi_2^m, \dots, \psi_s^p, \varphi^r$ характеризует настройку сети ФН на реализацию определенной функции F_k .

Если принять, что при отсутствии отказов ФН сети каждая совокупность L_q является элементом множества M , в котором каждой функции F_k соответствует подмножество N_k совокупностей L_q , то появление у ФН отказов вида $(1 \rightarrow 0)$ и $(0 \rightarrow 1)$, эквивалентных тождественному равенству 0 или 1 соответствующих коэффициентов x_{ij} матрицы A или коэффициентов y_i матрицы-столбца B (сводим все отказы ФН к отказам на его входах), приведет к сужению подмножества N_k и появлению нового подмножества N_k^{ij} совокупностей L_q^{ij} функций $\psi_1^{ij}, \psi_2^{mij}, \dots, \psi_s^{pij}, \varphi^{rij}$ ($l_{ij}, m_{ij}, p_{ij}, r_{ij} \in \{0, 1, \dots, 2^{2^0} - 1\}$), настраивающих сеть на реализацию функции F_k при наличии отказа у i -го ФН на j -м входе. При этом может оказаться, что совокупность функций L_q не войдет в подмножество N_k^{ij} совокупностей функций L_q^{ij} , обеспечивающих нормальную работу сети при отказе ФН. В этом случае необходимо восстановить (логически перестроить) сеть, настроив ее на совокупность функций L_q^{ij} , входящую в подмножество N_k^{ij} . Процесс восстановления заключается в последовательном подборе настроечных кодов для ФН сети, преобразующих совокупность функций L_q в L_q^{ij} . Следовательно, для минимизации во времени процесса восстановления необходимо свести к минимуму количество сочетаний настроечных кодов ФН, необходимых для преобразования L_q в L_q^{ij} .

Минимизацию можно произвести по следующему алгоритму:

- 1) для заданного набора функций F_k найти множество M ;
- 2) из множества M выделить все подмножества N_k ;
- 3) в каждом подмножестве N_k определить все подмножества N_k^{ij} ;
- 4) для каждого подмножества N_k найти области P_k взаимного пересечения подмножеств N_k^{ij} ;
- 5) из областей P_k составить группы R_n совокупностей функций L_q^{ij} , восстанавливающих сеть при любом отказе ФН, т. е. группы с полным набором значений индексов ij для обоих видов отказов;
- 6) для каждой функции F_k выбрать группу $\min R_n$ с наименьшим числом членов.

В дальнейшем группы R_n с минимальным числом членов станем называть минимальными кодовыми последовательностями настройки сети на реализацию заданной функции F_k .

Для иллюстрации изложенного алгоритма минимизации рассмотрим процесс нахождения минимальных кодовых последовательностей для канонической двухранговой сети ФН с $\delta = 2$ [5]. Очевидно, что количество различных функций F_k , реализуемых такой сетью, равно 2^{2^2} , т. е. $k = 0, 1, 2, \dots, 15$.

Для построения подобной функционально устойчивой сети необходимо, чтобы оба ФН первого ранга могли совместно настраиваться на реализацию всех шестнадцати функций двух переменных, а выходной ФН — на реализацию ограниченного класса функций, например 1 и 7 [2]. В случае отказов выходная функция F_k в такой сети восстанавливается путем перестройки выходного ФН. При этом функция, реализуемая выходным ФН сети, зависит от вида отказа и набора входных переменных. Поэтому функциональная устойчивость сети с отказом при использовании указанного способа восстановления достигается лишь в динамическом режиме. С технической точки зрения такой режим малоэффективен, так как требует сложной системы диагностики и перестройки логики ФН сети. К тому же сеть после отказа значительную часть времени находится в состоянии восстановления.

Устранить указанные недостатки можно путем выбора минимальных кодовых последовательностей настройки сети на реализацию требуемых функций F_k , которые бы восстанавливали сеть при любых отказах ФН и не зависели от набора входных переменных. Это позволяет осуществить алгоритм, предложенный в настоящей работе. Перейдем к его реализации для рассматриваемой сети ФН.

С помощью карт стабильности Майтра [6] легко находится множество M совокупностей L_q функций $\psi_1^l, \psi_2^m, \varphi^r$ ($l, m, r \in \{0, 1, \dots, 15\}$), настраивающих рассматриваемую сеть ФН на реализацию всех шестнадцати функций F_k двух переменных x_1 и x_2 . Из множества M выделяются подмножества N_k совокупностей L_q функций, настраивающих сеть на реализацию каждой функции F_k . Затем из каждого подмножества N_k составляются подмножества N_k^{ij} совокупностей L_q^{ij} функций, обеспечивающих логическую устойчивость сети при отказах j -х входов у i -х нейронов. С этой целью для каждого ФН находят такие настроечные функции из множества ψ_i^k, φ^k ($k = 0, 1, \dots, 15$), которые сохраняют правильный результат на выходе соответствующего ФН при наличии на его j -м входе отказов типа $(1 \rightarrow 0)$ и $(0 \rightarrow 1)$.

Очевидно, что для восстановления заданной функции F_k на выходе сети с отказавшим ФН необходимо, чтобы в множество настроечных функций входила та, которая сохраняет правильный результат на выходе отказавшего ФН. С этой целью из подмножеств N_k выбираются совокупности L_k^{ij} функций $\psi_2^{mij}, \psi_2^{mij}, \varphi^{rj}$, содержащие указанные настроечные функции, для всех возможных отказов в сети.

Затем в каждом подмножестве N_k находятся области P_k взаимного пересечения полученных подмножеств N_k' , из которых составляются группы R_n , включающие полный набор индексов i, j для обоих видов отказов. Из R_n выбираются группы $\min R_n$ с минимальным числом членов, т. е. минимальные кодовые последовательности для настройки отказавшей сети. Если для функции F_k существует несколько минимальных кодовых последовательностей, то при отсутствии ограничений на класс функций, реализуемых ФН, выбирается любая минимальная последовательность.

Полученные в результате выполнения предложенного алгоритма минимальные кодовые последовательности в целях настройки рассматриваемой сети на реализацию информационно значимых функций F_k представлены в таблице.

Номер функции F_k	Минимальная последовательность кодов настройки сети $\psi_1^{lij}; \psi_2^{mij};$ φ^{rj}	Номер функции F_k	Минимальная последовательность кодов настройки сети $\psi_1^{lij}; \psi_2^{mij};$ φ^{rj}	Номер функции F_k	Минимальная последовательность кодов настройки сети $\psi_1^{lij}; \psi_2^{mij};$ φ^{rj}
1	2; 12; 8 12; 2; 8 1; 1; 1	6	1; 8; 8 8; 1; 8 6; 6; 1	11	4; 4; 8 2; 11; 7 11; 2; 7 11; 11; 1
2	2; 2; 1 9; 4; 8 4; 9; 8	7	8; 8; 8 1; 7; 7 1; 7; 1 7; 7; 1	12	1; 2; 8 8; 4; 7 12; 12; 1
3	4; 8; 8 8; 4; 8 3; 3; 1	8	8; 8; 1 1; 6; 8 6; 1; 8	13	2; 2; 8 13; 4; 7 4; 13; 7 13; 13; 1
4	4; 4; 1 2; 9; 8 9; 2; 8	9	2; 4; 8 4; 2; 8 9; 9; 1	14	1; 1; 8 8; 14; 7 14; 8; 7 14; 14; 1
5	2; 2; 8 8; 2; 8 5; 5; 1	10	1; 4; 8 4; 1; 8 10; 10; 1	—	—

Для каждой функции F_k настроечные коды сети приведены в порядке убывания их корректирующей способности, под которой понимается количество отказов у ФН, не вызывающих искажения выходной функции F_k сети.

Из таблицы следует, что для рассмотренных серий ФН, реализующих функции F_k ($k = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 12$),

минимальная последовательность кодов настройки содержит три, а для сетей, реализующих функции F_k ($k = 7, 11, 13, 14$), — четыре совокупности L_q^{ij} функций, обеспечивающих функциональную устойчивость сети. Следовательно, при любом отказе ФН процесс восстановления в сетях первого типа сводится максимум к двум, а в сетях второго типа — максимум к трем перестройкам. При этом если на входе ФН первого ранга имеют место отказы вида $y_i \equiv 0$ или $y_i \equiv 1$, то совокупность настроечных функций сети для настройки выходного ФН должна содержать функцию 7 или 1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Потапов В. И. Функциональная надежность сетей из формальных нейронов. «Автоматика и вычислительная техника», 1968, № 1, с. 17—23.
2. Потапов В. И., Доценко М. Ф. Исследование свойств адаптивных логических сетей из нейроноподобных элементов методом математического моделирования. Сб. «Проблемы бионики», вып. 7. Изд-во Харьковск. ун-та, 1971, с. 16—24.
3. Потапов В. И., Миренков П. В., Воронкова Л. В. Многофункциональный пороговый элемент. Авт. свид. № 332575. «Бюллетень изобретений», 1972, № 10, с. 2—3.
4. Воронкова Л. В., Миренков П. В. Логический модуль на формальных нейронах с переменной структурой. Сб. «Проблемы бионики», вып. 7. Изд-во Харьковск. ун-та, 1971, с. 32—36.
5. Мкртчян С. О. Нейроны и нейронные сети. М., «Энергия», 1971. 232 с.
6. Maitra K. K. Stability of logical networks and its application to improvement of reliability. «IRE Trans. on Circuit Theory», CT-8, 3, 1961, p. 117.

КЛАССИФИКАЦИЯ СЛОВЕСНЫХ ЗАДАЧ

СООБЩЕНИЕ I

В. А. Ловицкий

На начальном этапе моделирования процесса переработки человеком словесной информации с помощью ЭЦВМ упрощенно можно считать, что речевая деятельность человека сводится к решению словесных задач в определенных последовательностях. Определив полный перечень словесных задач и установив иерархическую зависимость между ними, можно предположить, что успешное моделирование процесса решения этих задач на ЭЦВМ позволит реализовать в вычислительной машине сложную систему процессов переработки словесной информации и, таким образом, придать ей некоторые «человеческие» черты.

Непосредственному описанию системы классификации словесных задач предшествует определение понятия задачи. Данная статья посвящена формализации этого понятия.

Интуитивно под задачей понимается ситуация, согласно которой на основании некоторого исходного множества $X = \{x_1, x_2, \dots, x_l\}$, характеризующего «то, что дано», и по описанию «того, что необходимо найти», заданного конечным множеством $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_m\}$, требуется определить элементы конечного множества

$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$, представляющего собой результат решения задачи.

Процесс решения задачи сводится к нахождению или применению некоторого преобразователя F , устанавливающего соответствие между X и Y посредством конечной последовательности правил. Введем формальное определение понятия задачи.

Определение 1. Назовем задачей четверку $T = \langle X, Q, F, Y \rangle$, связанную одним из соотношений

$$X \wedge Q \vdash F \Rightarrow Y; \quad (1)$$

$$X \wedge Q \wedge Y \vdash F; \quad (2)$$

$$X \wedge Q \wedge F \vdash Y, \quad (3)$$

где символы $\wedge, \vdash, \Rightarrow$ использованы с целью формализации записи и читаются как «и», «дает», «влечет».

Для упрощения понятия задачи принимаем, что выражение $Q \wedge Y \vdash F \Rightarrow X$ не имеет самостоятельного значения и сводится к (1).

Если задано соотношение $Q \vdash F \Rightarrow Y$, то будем говорить, что задача *не определена*. Чтобы определить ее, нужно задать X , т. е. извлечь из внешней среды необходимую информацию. Соотношения $X \vdash F \Rightarrow Y$ и $X \wedge Y \vdash F$ вообще не имеют смысла.

Станем различать задачи первого и второго рода.

Определение 2. Четверка $T1 = \langle X, Q, F, Y \rangle$: $(X \wedge Q \vdash F \Rightarrow Y) \vee (X \wedge Q \wedge Y \vdash F)$ называется задачей первого рода.

Определение 3. Четверка $T2 = \langle X, Q, F, Y \rangle$: $(X \wedge Q \wedge F \vdash Y)$ называется задачей второго рода.

Через $T2^A$ будем обозначать задачу, у которой F представлено приемлемым алгоритмом [1] или алгоритмическим предписанием.

Обозначение $T2^P$ свидетельствует о том, что приемлемый алгоритм или алгоритмическое предписание F задачи $T2$ реализованы на языке конкретной ЭЦВМ. Следуя [1], задачи первого рода $T1$ назовем *проблемными*, а задачи $T2$ — *непроблемными*.

Пусть все множество словесных задач, с которыми человек сталкивается в своей речевой деятельности, задано конечным множеством $\Gamma_0 = \{T_1, T_2, \dots, T_s\}$, причем $T_i (T_i \in \Gamma_0) (i = 1, 2, \dots, s)$ представлены только задачами первого рода, т. е. $\forall T_i (T_i = T1)$, где \forall — квантор всеобщности. Моделирование процесса решения человеком словесных задач заключается в формировании конечного множества $\Gamma_2 \{T_1, T_2, \dots, T_i\}$ такого, что $\forall T_i (T_i = T2)$. Очевидно, что переход от множества Γ_0 к множеству Γ_2 осуществляется не непосредственно, а через множество $\Gamma_1 = \{T_1, T_2, \dots, T_v\}$, причем $\forall T_i \in \Gamma_1 (T_i = T1 \vee T2^A \vee T2^P)$, где символ \vee обозначает операцию разделительное «или».

Пусть на множествах $\Gamma_0, \Gamma_1, \Gamma_2$ задана операция непосредственного вхождения, которая вводится следующим определением.

Определение 4. Будем говорить, что задача T_i входит в задачу T_j (или задача T_j включает в себя задачу T_i), если результат решения T_i используется при решении T_j .

Эту операцию обозначим как $T_i \rightarrow T_j$ и станем считать, что « T_i непосредственно входит в T_j » или « T_j непосредственно включает в себя T_i ». Операция непосредственного вхождения удовлетворяет двум условиям:

1) данная операция не коммутативна, т. е. $\forall T_i \forall T_j (T_i \rightarrow T_j \neq T_j \rightarrow T_i)$;

2) $\forall T_i \forall T_j \forall T_k (T_i \rightarrow T_j \wedge T_j \rightarrow T_k \Rightarrow T_i \rightarrow T_k)$.

Если $T_1 \rightarrow T_2 \rightarrow \dots \rightarrow T_k$, то зависимость T_k от T_1 , или то, что без решения задачи T_1 нельзя решить T_k , обозначается как $T_1 \xrightarrow{k-2} T_k$. Целое число $k-2$ над стрелкой указывает на количество промежуточных задач, связывающих T_1 и T_k .

Введенная операция непосредственного вхождения показывает связи между задачами и определяет иерархическую структуру словесных задач, на которую накладывается

Ограничение 1. Иерархическая структура задач не должна иметь ориентированных циклов, т. е. $\forall v \forall T_i \forall T_j ((T_i \xrightarrow{v} T_j) \wedge (T_j \rightarrow T_i))$ ($v = 0, 1, \dots$). В противном случае задачи, охваченные обратной связью, требуется объединить в одну. Несоблюдение введенного ограничения может осложнить работу с иерархической структурой задач [2].

Определение 5. Если задачи T_1, T_2, \dots, T_k непосредственно входят в задачу T_i , т. е. $(T_1 \rightarrow T_i) \wedge (T_2 \rightarrow T_i) \wedge \dots \wedge (T_k \rightarrow T_i)$, то решение задачи T_i возможно только при условии решения всех задач T_1, T_2, \dots, T_k , т. е. $\bigwedge_{j=1}^k T_j \rightarrow T_i$.

Определение 6. Если $\neg \exists T_i ((T_i \rightarrow T_j) \wedge (T_j \in \Gamma_2))$, то задача T_j называется элементарной; если $T_j \in \Gamma_0$, то она называется начальной. Если $T_j \in \Gamma_1$ и выполняется условие, что $\neg \exists T_i (T_i \rightarrow T_j)$, то задача называется элементарной, когда $T_j = T_2^P$, и начальной, когда $T_j = T_1 \vee T_2^A$. Здесь \exists — квантор существования.

Разобьем все множество задач по уровням. Первый составят элементарные, или начальные задачи, которые обозначим через $T_i(1)$. Задача T_j будет принадлежать x -уровню, если $\exists T_i(1) (T_i(1) \xrightarrow{x-2} T_j)$. Этот факт обозначим как $T_j(x)$. Допустимы случаи, когда справедливо соотношение

$$\forall x \exists T_i(x) (T_i(x) \rightarrow T_j(x+v)) \quad (v = 2, 3, 4 \dots) \quad (4)$$

Определение 7. Рангом задачи T_i называется число всех задач, зависящих от T_i .

Ранг задачи обозначим через $R(T_i)$ [3].

Ранг задачи $T_i(x)$ определяется по формуле

$$R(T_i(x)) = \sum_{v=1}^{l_x} T_j(x+v). \quad (5)$$

При этом $\forall v(T_i(x) \xrightarrow{x-1} T_j(x+v))$ с учетом (4). Ранг задачи позволяет установить ее приоритет. В формуле (5) величина $T_j(x+l_x)$ обозначает задачу, которая не входит ни в какую другую, т. е. $\neg \exists T_k(x+l_x+1)(T_j(x+l_x) \rightarrow T_k(x+l_x+1))$, и ее ранг равен нулю.

Определение 8. Сложностью задачи $T_i(x)$ называется число всех задач, которые в нее входят. Сложность задачи обозначим через $C(T_i(x))$ и будем определять ее по формуле

$$C(T_i(x)) = \sum_{v=1}^{x-1} T_j(x-v), \quad (6)$$

причем $\forall v(T_j(x-v) \xrightarrow{x-1} T_i(x))$ с учетом (4).

Иерархическая структура словесных задач формируется с помощью ЭЦВМ, использующей в качестве входной информации массив задач, каждой из которых ставится в соответствие одна или несколько задач, непосредственно входящих в нее. Очевидно, что в результате формирования Γ_0 получим такие задачи T_j , для которых справедливо утверждение $\exists T_j \neg \exists T_i \neg \exists T_k(T_i \rightarrow T_j \rightarrow T_k)$. В процессе решения таких задач осуществляется переход к задачам T_i , для которых выполняется условие $\exists T_j \exists T_i(T_j \rightarrow T_i)$ или $\exists T_i \exists T_j(T_i \rightarrow T_j)$. Для задач множества Γ_2 выполняется условие $\forall T_j \exists T_i \exists T_k(T_i \rightarrow T_j \vee T_j \rightarrow T_i \vee T_i \rightarrow T_j \rightarrow T_k)$.

Предварительно формирование и работа с иерархической структурой словесных задач проводились на множестве Γ_0^* ($\Gamma_0^* \subset \Gamma_0$), мощность которого равнялась 21. В результате моделирования процесса решения этих задач на ЭЦВМ было получено множество Γ_2^* ($\Gamma_2^* \subset \Gamma_2$), мощность которого была равна 28. Все множество задач распределилось по четырем уровням. Для данной структуры $R_{\max}(T_i(1)_{T_i \in \Gamma_2^*}) = 13$, а $C_{\max}(T_i(4)_{T_i \in \Gamma_2^*}) = 10$. Интересно

отметить, что выделенные в процессе перехода от Γ_0 к Γ_2 шесть элементарных задач первого уровня (1) (узнавание буквы или слова; 2) разделение слова на буквы или словосочетания на слова и т. д.) подтвердили предположение [4] о том, что существуют такие информационные процессы, без которых человек не может обойтись как при решении различного рода словесных задач, так и при обучении.

По сути, элементы множества Γ_2 представляют собой подпрограммы, к которым обращались или непосредственным указанием номера подпрограммы, или в ряде случаев указанием класса задач, к которому относилась задача, подлежащая решению.

Конкретный выбор подпрограммы осуществлялся системой, обслуживающей иерархическую структуру словесных задач, в результате анализа входной информации.

Детальная разработка множества Γ_2 позволит перейти к созданию информационного языка, предназначенного для непосредственного общения с ЭЦВМ в режиме диалога.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глушков В. М. и др. Человек и вычислительная техника. Киев, «Наукова думка», 1971. 290 с.
2. Романенко И. П. Анализ функциональных подсистем автоматических систем планирования и управления. Тезисы докл. I конф. по оптимальному планированию и управлению народным хозяйством. М. 1971, с. 38—43.
3. Чумаченко Н. Г., Айвазян Ю. А., Трум В. Е. Классификация задач автоматизации управления производством. «Экономика и математические методы», IV, 1, с. 108—112.
4. Фейгенбаум Э. Моделирование вербального обучения. Сб. «Вычислительные машины и мышление». М., «Мир», 1967, с. 168—173.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ СИЛОВЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ КАК ПАРАМЕТРЫ, КОДИРУЮЩИЕ ОБРАЗ, И СВЯЗЬ ЭТИХ ОЦЕНОК С ПАРАМЕТРАМИ ТЕРМОДИНАМИКИ

В. В. Морозов

На каком-либо поле рецепторов при раздражении его всегда создаются пространственные комбинации возбужденных клеток, которые способны взаимодействовать друг с другом. Природа указанного взаимодействия может быть различной, однако несомненно, что оно (по крайней мере, в течение некоторого промежутка времени) сохраняет в себе особенности образа-воздействия, вызвавшего соответствующее раздражение рецепторов.

В связи с этим целесообразно проанализировать силовые взаимодействия элементов простейших систем и определить возможности использования их численных оценок в качестве параметров, несущих информацию об образе-воздействии, являющемся причиной появления силового взаимодействия.

В качестве объекта исследования выберем решетку, ячейки которой представляют собой равносторонние треугольники. Предположим, что в узлах данной решетки могут располагаться одинаковые шары, диаметр которых равен стороне ячейки решетки. Это означает, что при заполнении всех узлов решетки шарами последние будут уложены наиболее плотно.

С помощью шаров (как в мозаике) на решетке могут собираться различные фигуры — образы. Будем рассматривать их как информацию, записанную шарами на решетке. Попытаемся оценить указанную информацию количеством информации по Шен-

нону-Винеру. Для этого данную задачу необходимо поставить как задачу о выборе.

Если имеется априорная информация лишь о том, что фигура на решетке, содержащей σ узлов, собрана из n шаров, то число различных раскладок шаров на сетке может быть оценено числом

$$P_{c.ш} = \frac{\sigma!}{(\sigma - n)!n!} \quad (1)$$

При этом каждая из раскладок может считаться фигурой, отличающейся от другой формой, размерами или расположением на сетке. Если считать выбор любой из $P_{c.ш}$ фигур равновероятным, то количество информации, сопоставимое с выбором одной из них, определяется как

$$J = -\ln P_{c.ш} \quad (2)$$

Однако (2) характеризует не форму фигуры, а лишь возможность системы из σ узлов и n шаров набирать с их помощью определенное число фигур ($P_{c.ш}$). Если же нас интересует форма фигуры, то информация, которую необходимо получить или передать, заключается прежде всего в указании взаимного положения шаров относительно друг друга. Последнее можно характеризовать расстояниями R'_k между центрами шаров, которые в дальнейшем и будем называть связями.

Число связей в фигуре, образованной n шарами, составляет

$$N = \frac{1}{2} n (n - 1), \quad (3)$$

и оно гораздо больше, чем необходимое число координат, определяющее расположение шаров на решетке ($2n$). Поэтому сообщение о фигуре, содержащее данные о числе связей (N) и их длинах (R'_k), будет содержать избыток информации. В связи с этим рассмотрим сообщение о фигуре, которое содержит лишь следующие данные: N — число связей в фигуре; l_k — количество связей k -го сорта, где k пробегает значения от 1 до μ ; μ — количество различных сортов связей, причем сортом мы называем совокупность связей одинаковой длины R'_k . Заметим, что $\sum_1^{\mu} l_k = N$, а если все связи различны, то $l_k = 1$ и $\mu = N$. Передача указанных данных дает лишь частичное представление о фигуре, собранной на сетке, поскольку отражает только разнообразие связей, присущих этой фигуре. Однако упомянутый набор данных позволяет сопоставить фигуры, собираемые из заданного набора связей, с некоторым числом.

Действительно, число, образуемое всем набором приведенных выше данных, может быть представлено в виде

$$P_{\Phi} = \frac{N!}{\prod_1^{\mu} l_k!} \quad (4)$$

Величина P_Φ может рассматриваться как количество фигур, которые собираются из заданного набора связей.

При большом числе связей (N), воспользовавшись формулой Стирлинга, получим

$$\ln P_\Phi = -N \sum_{k=1}^{k=\mu} \frac{l_k}{N} \ln \frac{l_k}{N} = -N \sum_{k=1}^{k=\mu} P_k \ln P_k, \quad (5)$$

где $P_k = \frac{l_k}{N}$ можно интерпретировать как вероятность выбора в наборе из N связей одной связи сорта k .

Величина (5) с обратным знаком будет представлять собой количество информации по Шеннону — Винеру (J_B), которое может быть сопоставлено с фигурой, содержащей μ различных сортов связей при их общем числе, равном N . При $N = \text{const}$ ($n = \text{const}$) изменение взаимного расположения шаров, составляющих фигуру, найдет свое отражение в изменении чисел μ и l_k . Это означает, что (5) чувствительно к изменению формы фигуры: большему абсолютному значению $J_B = -\ln P_\Phi$ соответствуют вытянутые фигуры типа полос, а наименьшему значению J_B — компактные фигуры типа круга или многоугольника.

Количество информации, подсчитанное описанным выше образом, характеризует в общем случае лишь сложность фигуры или разнообразие ее связей и в этом отношении обладает тем же недостатком, что и количество информации в теории связи: последнее не отражает важности или других качественных особенностей сообщения. Поэтому J_B в общем случае* не может служить кодовым параметром определенной фигуры. В связи с этим проанализируем, какую информацию о фигуре на сетке можно получить при учете силовых взаимодействий между шарами (элементами) фигуры.

Если приписать шарам какую-либо массу или электрический заряд одного знака, то между каждой парой шаров, расположенных в узлах решетки, возникает сила притяжения или отталкивания

$$F = k_1 \frac{m^2}{(R')^2}, \quad (6)$$

где k_1 — коэффициент пропорциональности;

m — масса или величина заряда (все шары приняты одинаковыми, т. е. $m_1 = m_2 = \dots = m_n$);

R' — длина связи (расстояние между узлами решетки, в которые помещены шары, или же расстояние между центрами шаров).

* В некоторых предельных случаях (5) достаточна для получения полного представления о форме фигуры, например, если $N = 10$ ($n = 5$), то задание чисел $l_1 = 4$, $l_2 = 3$, $l_3 = 2$, $l_4 = 1$ присуще только прямой линии, сложной из пяти шаров, а при $N = n = 3$ и $l_1 = 3$ фигурой может быть только равнобедренный треугольник.

Поскольку между каждой парой шаров, образующих фигуры, будет действовать сила (6), то силовое поле, образуемое шарами фигуры, может быть полностью описано путем указания величин и направлений всех сил, действующих на каждый шар. Число необходимых параметров в этом случае составит $2N$, где N , как и ранее, — количество связей между шарами фигуры. Число $2N$ гораздо больше количества необходимых данных, которые определяют положение шаров на сетке ($2n$) и по которым форму фигуры можно полностью восстановить. Поэтому следует несколько сократить данные, характеризующие силовое поле, сохранив при этом отраженную в последнем информацию о форме набранной на сетке фигуры. Прежде всего можно не учитывать сведений о направлении сил, действующих по связям. Это означает, что целесообразно ограничить сведения о поле какими-либо скалярными величинами. Наиболее подходящей при такой постановке задачи будет являться величина потенциальной энергии, которая для пары шаров может быть подсчитана по формуле

$$E_n' = \pm \int_{r_{\min}}^{R'} k_1 m^2 \frac{dR'}{(R')^2} = \pm k_1 m^2 \left[\frac{1}{r_{\min}} - \frac{1}{R'} \right], \quad (7)$$

где r_{\min} — минимальное расстояние между центрами шаров, находящихся в соприкосновении ($r_{\min} = d_{\text{шар}}$);

R' — длина связи (расстояние между центрами шаров).

Так как для выбранной решетки $r_{\min} = \text{const}$, то E_n' зависит только от расстояния между шарами R' , т. е. от того параметра, который более всего необходим при оценке взаимного расположения шаров фигуры. Максимальный запас энергии, которым может обладать система из двух шаров, находящихся на бесконечно большом расстоянии друг от друга, равен

$$E_0' = \pm k_1 m^2 \frac{1}{r_{\min}}. \quad (8)$$

Поэтому E_n' можно представить в виде

$$E_n' = E_0' - E_k', \quad (9)$$

где

$$E_k' = \pm k_1 m^2 \frac{1}{R'}. \quad (10)$$

Значение $|E_k'|$ можно рассматривать как работу, которую произвела система из двух шаров при сближении или удалении их до R' при $|E_0'| = \text{const}$, или как кинетическую энергию, которую система может при этом получить.

Значения E_n' , E_k' и E_0' удобнее представить в безразмерной форме, для чего правые и левые части (8)—(10) следует разделить на $\frac{k_1 m^2}{r_{\min}} = \text{const}$. При этом

$$|E_n^2| = 1 - \frac{1}{R}; \quad |E_k^2| = \frac{1}{R}; \quad |E_0^2| = 1, \quad (11)$$

где степень при E^2 указывает, что система состоит из двух шаров, а

$$R = \frac{R'}{r_{\min}}. \quad (12)$$

Для системы из n шаров соответствующие значения безразмерных энергий (при справедливости принципа суперпозиции) могут быть подсчитаны как

$$E_0^n = N = \frac{1}{2} n(n-1); \quad (13)$$

$$E_n^n = \sum_{k=1}^{k=N} \left(1 - \frac{1}{R_k}\right) = \sum_{k=1}^{k=N} l_k \left(1 - \frac{1}{R_k}\right); \quad (14)$$

$$E_k^n = \sum_{k=1}^{k=N} \frac{1}{R_k} = \sum_{k=1}^{k=N} \frac{l_k}{R_k}, \quad (15)$$

где обозначения N , l_k , μ имеют ранее обусловленные значения, а R_k — длина k -й связи.

Если для каждой пары шаров фигуры заданы значения E_{μ}^n , т. е. известно N этих значений, то такая информация (при известном алгоритме ее переработки) позволяет восстановить форму фигуры. Однако величины (13)—(15) дают представление лишь об интегральных свойствах фигуры. В связи с этим возникает вопрос, способны ли указанные параметры служить кодом конкретной фигуры, собираемой с помощью шаров на рассматриваемой решетке, и при каких условиях это возможно. Проведенные расчеты показали, что для фигур, собранных из соприкасающихся шаров, пара чисел E_0^n и E_n^n действительно может служить кодом данной фигуры. Величины E_0^n и E_n^n и фигуры, ими кодируемые, представлены на рис. 1. Однако и при отмеченном ограничении, встречаются редкие исключения, когда паре указанных чисел соответствуют две геометрические фигуры. Условия, при которых возможно однозначное кодирование фигур парой чисел E_0^n и E_n^n и ограничения, накладываемые для этого на фигуры, в общем виде не анализировались. Однако данная проблема может быть решена сравнением сумм $E_{k1}^n = \sum_1^N \frac{1}{R_{k1}}$ и $E_{k2}^n = \sum_1^N \frac{2}{R_{k2}}$, где R_{k1} и

R_{k2} — длины связей, характеризующие геометрически разные фигуры 1 (R_{k1}) и 2 (R_{k2}). При этом длины связей выбираются из массива (свойства сетки)

$$R_k = \frac{1}{2} \sqrt{3l^2 + n^2}, \quad (16)$$

где l , n — целые числа, которые одновременно выбираются четными или нечетными. Если $E_{k1}^n = E_{k2}^n$, то однозначное кодирование

ние невозможно и в этом случае необходимо накладывать дополнительные ограничения на сами фигуры, например собирать их из двойных цепочек плотно соприкасающихся шаров либо определять число исключений, связанных с возможностью неоднозначного кодирования. Однако если указанный код частично вырожден, то его анализ и использование не лишены смысла, поскольку сам код представляется «естественным», так как может быть «заложен» в рецепторные поля, элементы которых способны к силовому взаимодействию.





















1	 $E_0^3=3$ $E_n^3=0$	8	 $E_0^5=15$ $E_n^6=2,69$	15	 $E_0^8=28$ $E_n^8=7,20$
2	 $E_0^4=6$ $E_n^4=0,42$	9	 $E_0^6=15$ $E_n^6=2,79$	16	 $E_0^8=28$ $E_n^8=7,32$
3	 $E_0^4=6$ $E_n^4=1,26$	10	 $E_0^6=15$ $E_n^6=2,86$	17	 $E_0^8=28$ $E_n^8=7,37$
4	 $E_0^4=6$ $E_n^4=1,34$	11	 $E_0^6=15$ $E_n^6=4,03$	18	 $E_0^8=28$ $E_n^8=7,49$
5	 $E_0^4=6$ $E_n^4=1,66$	12	 $E_0^7=21$ $E_n^7=4,03$	19	 $E_0^8=28$ $E_n^8=7,57$
6	 $E_0^5=10$ $E_n^5=1,34$	13	 $E_0^7=21$ $E_n^7=4,73$	20	 $E_0^8=28$ $E_n^8=7,69$
7	 $E_0^5=10$ $E_n^5=3,24$	14	 $E_0^7=21$ $E_n^7=4,85$	21	 $E_0^8=28$ $E_n^8=8,03$

Рис. 1.

Кроме того, преимуществом «энергетического» кода является независимость его параметров от расположения (ориентации) фигуры на сетке, что не требует привязки фигуры к какой-либо системе координат.

С учетом того, что значение E_k^n из (15) представляет собой сумму энергий, обусловленных отдельными связями, и что эту

сумму можно рассматривать как энергию ансамбля N или μ систем, обладающих соответственно энергиями $E_k = \frac{1}{R_k}$ (или $E_k = \frac{l_k}{R_k}$), допустимо, формально применяя метод Гиббса*, ввести логарифмическую оценку, связанную со значением E_n^n :

$$\ln P_n^n = \ln \frac{1}{W_n^n} = E_k^n = E_0^n - E_n^n, \quad (17)$$

где $W_n^n \cong l^{-E_k^n}$ — вероятная способность фигуры из n шаров к обладанию потенциальной энергией E_n^n .

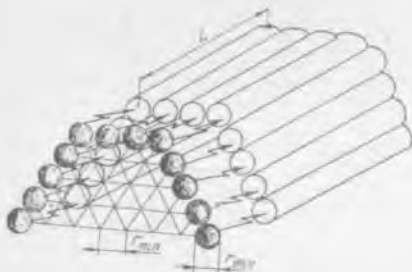


Рис. 2.

При $E_0^n = \text{const}$ ($n = \text{const}$) значение $\ln P_n^n = E_k^n$ представляет собой аналог физической энтропии, а E_0^n и E_n^n соответственно могут считаться аналогами полной и свободной энергии систем, находящейся при $T = \text{const}$.

Рассмотрим другое силовое взаимодействие, которое может быть сведено к взаимодействию элементов анализируемой сетки. Представим, что сетка имеет вид поперечного среза системы параллельных, плотно уложенных проводов одинакового диаметра $d = r_{\text{min}}$ (рис. 2). Если по отдельным проводам такой системы протекают токи одинакового направления, то между ними возникают силы, стремящиеся сблизить взаимодействующие провода.

Сила взаимодействия между парой упомянутых проводов с током определится как

$$F = k_2 \frac{I_1 I_2 L}{R'}, \quad (18)$$

где k_2 — коэффициент пропорциональности;

I_1, I_2 — сила тока в проводах 1 и 2;

L — длина параллельных проводов;

R' — расстояние между проводами.

Если токи в проводах одинаковы, т.е. $I = I_1 = I_2$, то (18) запишется в виде

$$F = k_3 \frac{I^2 L}{R'}, \quad (19)$$

где k_3 — новый коэффициент пропорциональности.

* Л. В. Радужкевич. Курс статистической физики. М., «Прогресс», 1968.

Из (19) следует, что при указанных условиях сила взаимодействия между проводами зависит только от взаимного расположения проводов в пучке, т. е. от длины связей, соединяющих узлы решетки, в которых расположены торцы взаимодействующих проводов.

Пропуская ток по соответствующим проводам, можно получить различные силовые поля, которые будут связаны с формой фигуры, образованной торцами проводов с током. По причинам, указанным выше, определим значение потенциальной энергии, которая соответствует паре проводов, находящихся на расстоянии R' друг от друга:

$$E_n' = k_n \int_d^{R'} \frac{dR'}{R'} = k_3 \ln \frac{R'}{d} = k_3 \ln R, \quad (20)$$

или в относительных единицах

$$E_n^2 = \ln R, \quad (21)$$

где $R = \frac{R'}{d}$ — относительная длина связи, измеренная числом диаметров провода.

Для системы из n проводов значение E_n^n может быть подсчитано по выражениям

$$E_n^n = \sum_{k=1}^{k=N} \ln R_k = \sum_{k=1}^{k=\mu} l_k \ln R_k = \ln \left(\prod_{k=1}^{k=N} R_k \right) = \ln \left(\prod_{k=1}^{k=\mu} R_k^{l_k} \right), \quad (22)$$

причем здесь, как и ранее, $\sum_{k=1}^{k=\mu} l_k = N$, где $N = \frac{1}{2} n(n-1)$; μ — число сортов связей в фигуре; l_k — число связей длиной R_k в k -м сорте.

Как следует из (22), все выводы о возможности кодирования фигур парами чисел E_n^n и E_n^n предыдущего примера справедливы и в данном случае, где в качестве первого кодового параметра принято N , а второго — значение (22). Здесь необходимо обратить внимание на логарифмическую меру E_n^n и на возможность определения её с помощью подсчета произведений

$$\prod_{k=1}^{k=N} R_k = \prod_{k=1}^{k=\mu} R_k^{l_k} = V_N. \quad (23)$$

Последние можно интерпретировать как объемы V_N N -мерных пространств. В этом случае кодом фигуры являются размерность пространства N , а также величина объема, занимаемого конкретной фигурой E_n^n , которая сопоставляется с точкой N -мерного фазового пространства. Координатами данной точки служат длины связей R_k ($k = 1 \div N$). Введение N -мерного фазового пространства позволяет выявить аналогии, связывающие величины анализируемого кода с соответствующими параметрами термодинамики.

Действительно, физическая энтропия системы из n частиц идеального газа, равномерно распределенных по z одинаковым ячейкам, занимающим объем V , может быть найдена по формуле

$$S' = k \ln P \cong kn \ln z = -kn \ln \frac{1}{z}, \quad (24)$$

где $P = \frac{n!}{\left[\left(\frac{n}{z}\right)!\right]^z}$ — термодинамическая вероятность, логарифм которой $\ln P = n \ln z$, а k — постоянная Больцмана.

Учитывая, что $z = \frac{V}{v_{\text{я}}}$ или $\frac{1}{z} = \frac{v_{\text{я}}}{V}$, где $v_{\text{я}}$ — объем одной из ячеек, величину $\frac{1}{z}$ будем рассматривать как вероятность выбора одной определенной ячейки из z возможных. Если представить ячейку z в виде кубика с ребром r_{min} и объемом $v_{\text{я}} = r_{\text{min}}^3$, а весь объем системы, занимаемой частицами идеального газа, как куб с ребром R' , то (24) может быть переписано в виде

$$S' = -k 3n \ln \frac{r_{\text{min}}}{R'}.$$

После деления на постоянную Больцмана

$$S = \frac{S'}{k} = -3n \ln \frac{r_{\text{min}}}{R'}. \quad (25)$$

К аналогичному виду может быть приведено выражение (22), если все связи в нем ($R'_1 = R'_2 = \dots = R'_N$) положить равными (это допущение практически реализуемо только при $n = 3$). Действительно, в этом случае

$$E_{\text{n}}^n = -\ln \frac{1}{R_k^N} = -\ln \frac{r_{\text{min}}^N}{(R_k)^N} = -\ln \frac{v_N}{V_N} = -N \ln \frac{r_{\text{min}}}{R_k}. \quad (26)$$

Выражения (25), (26) отличаются только размерностью многомерных фазовых пространств: если в (25) энтропия определяется в пространстве $3n$ измерений, то E_{n}^n в (26) является аналогом физической энтропии, определяемой в пространстве N измерений. Тождество уравнений (25) и (26) не ограничивается их смыслом. Легко показать, что работа, которая может быть получена или затрачена на деформацию фигуры, образуемой торцами параллельных проводов, численно равна разности

$$\begin{aligned} A_{\text{пр}} = E_{\text{n}2}^n - E_{\text{n}1}^n &= -\left[\sum_1^N \ln \frac{r_{\text{min}}}{R_{k2}} - \sum_1^N \ln \frac{r_{\text{min}}}{R_{k1}} \right] = \\ &= -\ln \frac{\prod_1^N R_{k1}}{\prod_1^N R_{k2}} = \ln \frac{V_{N2}}{V_{N1}}, \end{aligned} \quad (27)$$

где индексы «2» соответствуют параметрам фигуры после деформации, а индексы «1» — параметрам фигуры в исходном состоянии.

Аналогично определяется работа, требующаяся для концентрации частиц идеального газа в некоторых из z ячеек при изотермическом сжатии:

$$A_{\text{газ}} = S_2 - S_1 = n \ln \frac{V_2}{V_1} = n \ln \frac{V_{3n2}}{V_{3n1}}, \quad (28)$$

где V_1, V_2 — трехмерные объемы, занимаемые частицами идеального газа до и после сжатия; V_{3n1}, V_{3n2} — соответствующие $3n$ -мерные объемы.

Сравнивая выражения (27) и (28), заключаем, что процесс формирования новой фигуры из исходной при постоянном n требует затрат безразмерной работы, численное значение которой определяется только конечным и начальным состояниями, характеризующимися соответствующими объемами многомерных пространств до и после процесса формирования. В этой связи рассмотрим формирование геометрически подобных фигур, у которых

$$\frac{R_{k2}}{R_{k1}} = \xi = \text{const}. \quad (29)$$

В данном случае для системы параллельных проводов

$$A_{\text{пр}} = N \ln \xi, \quad (30)$$

т. е. количество работы определяется при $n = \text{const}$ только масштабом преобразования. В процессе преобразования точка, отображающая в N -мерном пространстве геометрически подобные фигуры, движется по многомерной «прямой», соединяющей исходную фигуру и начало N -мерной системы координат.

В аналогичном случае для системы шаров или зарядов количество работы будет зависеть от размеров исходной фигуры:

$$A_{\text{шар}} = \left(1 - \frac{1}{\xi}\right) \sum_1^N \frac{1}{R_{k1}} = (1 - \xi) E_{k1}^n. \quad (31)$$

Анализ рассмотренных аналогий показал, что введение энергетических оценок информации открывает возможности для использования методов статистической физики при исследовании состояний систем, адекватных записи некоторой информации.

Последнее может быть полезно при моделировании сетчатки глаза, пучка нервных волокон или систем, имитирующих работу мозга.

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЕТЕКТОРОВ ПРИЗНАКОВ ЗРИТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ

*Ю. П. Бугай, В. А. Бахтигозин, Ю. И. Зозуля,
В. Г. Червов*

Элементы изображения, поступающие в зрительную систему, подвергаются многократному алгебраическому сложению с различными весами на суммирующих нейронах. Область поверхности или пространства, с которой сигналы поступают на нейрон, называется рецептивным полем данного суммирующего нейрона. Пространственная форма рецептивного поля и его временные характеристики определяют функциональные особенности поля, которое вместе с суммирующим нейроном часто именуют детектором локального признака или локальным детектором. Однородные и неоднородные нервные слои, образованные из локальных детекторов, назовем просто детекторами признаков. Детекторы способны выделять определенный признак в любом месте в пределах слоя.

Для решения задач распознавания необходимы системы, реализующие выделение различных наборов признаков входных сигналов. Однако в настоящее время используются в основном субъективные оценки полезности тех или иных признаков и их наборов, так как иных, более строгих способов оценки не существует.

Важной особенностью выделяемых признаков может быть, например, отсутствие корреляции между ядрами преобразований, обеспечивающих выделение различных признаков. В качестве полезных признаков распознаваемых объектов применяются, в частности, характерные элементы их контурных изображений (ориентация прямолинейных участков, кривизна и положение криволинейных участков контура, точки пересечения линий, изломы, концы линий и т. д.) и контурные изображения в целом. Так, применение корреляционных методов для распознавания фигур оказывается более эффективным, если предварительно уменьшена избыточность изображений путем выделения контуров [1]. Можно ожидать увеличения эффективности корреляционных методов распознавания, если в изображениях дополнительно выделять признаки уже самих контурных изображений.

Существует широкий класс анизотропных интегральных детекторов, которые могут быть исследованы с помощью простых оптических моделей в некогерентном свете. К ним относятся детекторы ориентации и кривизны контурных линий, а также детекторы фигур простых и сложных форм. В настоящей работе рассмотрены две разновидности оптических моделирующих устройств с линзами и без них.

На рис. 1 изображена оптическая моделирующая система, которая позволяет воспроизводить любую форму зоны суммирования рецептивного поля. Формально эта система осуществляет интегральное преобразование с любым положительным ядром. Некогерент-

ный свет от источника 1 через конденсатор 2 и матовое стекло 3 попадает на исследуемый объект 4, выполненный в виде диапозитива. Каждая точка объекта 4 с помощью линзы 5 и апертурной маски 6 в плоскости 7, не сопряженной с плоскостью объекта 4, образует уменьшенную проекцию апертурной маски 6. Таким образом, изображение объекта 4 в несопряженной плоскости 7 будет представлять собой некоторое распределение освещенности,

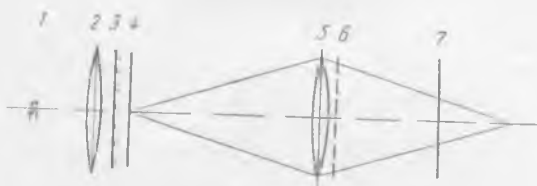


Рис. 1.

пропорциональное функции $I(x)$, которая определяется выражением

$$I(x) = \iint_s I_0(x_0) G(x_0, x) dx_0, \quad (1)$$

где x — точка (x, y) двумерной области на выходе системы;

$I_0(x_0)$ — распределение освещенности, характеризующее двумерный объект;

$G(x_0, x)$ — функция рассеяния точки оптической системы (ядро интегрального преобразования), задаваемая формой апертурной маски.

Функциональная схема безлинзовой оптической моделирующей системы представлена на рис. 2. В этой системе каждая точка исходного пространственного объекта 1 с помощью апертурной маски 2 расфокусируется в плоскости изображения 3. При этом каждая точка исходного объекта 1 в выходной плоскости образует центральную проекцию апертурной маски. При неизменном расстоянии между маской и плоскостью изображения масштаб, форма и положение центральной проекции будут зависеть от расположения точки объекта в пространстве по отношению к апертурной маске 2. Оптическое преобразование исходного пространственного объекта в безлинзовой моделирующей системе описывается интегральным преобразованием,

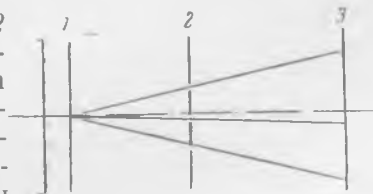


Рис. 2.

подобным выражению (1). Для трехмерного объекта это преобразование имеет вид

$$I(\vec{x}) = \iiint_V I_0(\vec{x}_0) G(\vec{x}_0, \vec{x}) d\vec{x}_0. \quad (24, 6)$$

где \vec{x}_0 — точка (x_0, y_0, z_0) пространственного объекта,

$I_0(\vec{x}_0)$ — распределение освещенности исходного пространственного объекта;

$G(\vec{x}_0, \vec{x})$ — функция рассеяния точки оптической системы, задаваемая формой маски;

$I(\vec{x})$ — расфокусированное изображение в выходной области системы.

Для параксиальной области системы оптическое преобразование можно принять практически однородным и описать его трехмерным уравнением свертки

$$I(\vec{x}) = I_0(\vec{x}) *** G(\vec{x}). \quad (2')$$

В работах [2—4] рассмотрены физические и математические модели нервных структур зрительного анализатора. Особенностью этих моделей является их принадлежность к системам непрерывного типа, в которых нейронные слоистые структуры представлены в виде непрерывных однородных сред.

Реакция нейронной среды $U(\vec{x}, t)$ на возмущение $E(\vec{x}, t)$ может быть записана в виде интегрального преобразования

$$U(\vec{x}, t) = \iiint_{V_{-\infty}}^t E(\vec{x}_0, t) Q(\vec{x}_0, \vec{x}, t) d\vec{x}_0 dt, \quad (3)$$

где $Q(\vec{x}_0, \vec{x}, t)$ — точечная реакция нейронной среды.

Для безынерционных двумерных сред реакция среды описывается более простым выражением

$$U(\vec{x}) = \iint_S E(\vec{x}_0) Q(\vec{x}_0, \vec{x}) d\vec{x}_0. \quad (3')$$

Из сравнения уравнений (1)—(3) и (3') следует, что входному возмущению E нейронной среды соответствует функция объекта I_0 , моделирующей оптической системы, а точечной реакции нейронной среды Q — функция рассеяния точки оптической системы G , задаваемая формой апертурной маски. С другой стороны, функция рассеяния точки оптической системы G , представляющая собой изображение точки объекта в выходной плоскости системы, или масштабированную копию апертурной маски, является физической реализацией ядра интегрального преобразования, осуществляемого моделирующей системой.

На рис. 3 приведены тестовое изображение 1, предъявляемое на входе оптической системы, апертурные маски 1, 3, 5 и изображения, полученные в выходной плоскости оптической системы 2, 4, 6. При использовании в качестве апертурных масок 1, 3, 5

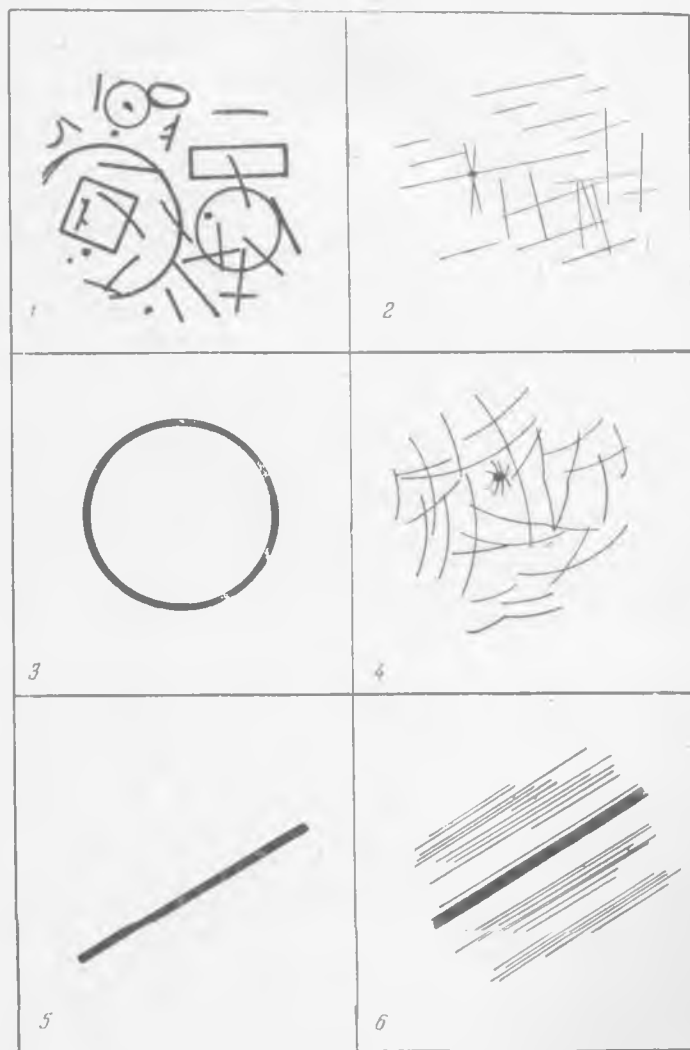


Рис. 3.

на выходе оптической системы получены соответственно изображения 2, 4, 6. На каждом из них максимумы выходных сигналов имеют вид темных точек (2, 4) и темной линии (6) на сложном фоне. Фоновые компоненты выходных сигналов (позиции 2, 4, 6)

могут быть сильно уменьшены либо исключены совсем — например при предъявлении этих изображений телевизионной системе, в которой использовано пороговое устройство. Максимум на изображениях 2, 4, 6 соответствует тому или иному выделяемому признаку в тестовом изображении 1. Так, максимум (позиция 2) отвечает предъявлению тестового изображения в целом; максимум (позиция 4) определяет наличие в тестовом изображении 1 окружности или части ее с заданным радиусом кривизны. Темная линия на тестовом изображении 1 выделена посредством апертурной маски 5. Наличие того или иного признака предъявляемого изображения может быть установлено визуально либо с помощью автоматического устройства, например, телевизионной системы. Для этого изображение, полученное на выходе оптического фильтра детектора, предъявляется на входе телевизионной системы. Наиболее яркие точки изображения, соответствующие тому или иному признаку, выделяются путем определения максимальных значений видеосигнала с помощью порогового устройства.

Сигнал, превышающий порог, свидетельствует о наличии выделяемого признака.

ВЫВОДЫ

В отличие от рассмотренных ранее телевизионных моделей детекторов [2] предлагаемая моделирующая система не требует применения специализированных генераторов, реализующих различную форму апертур в телевизионных системах. Оптическая система не устанавливает границ выбора формы апертуры, исключает необходимость сканирования объекта и практически мгновенно выделяет признак по всей рабочей области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ловенталь С., Бельво И. Пространственная фильтрация и голография — новое в когерентной оптике. М., «Энергия», 1970. 72 с.
2. Нефедов Ю. И., Червов В. Г., Бугай Ю. П. Моделирование процессов первичной обработки информации в зрительном анализаторе с помощью телевизионной системы. Сб. «Проблемы бионики», вып. 3. Изд-во Харьковск. ун-та, 1970, с. 142—148.
3. Зозуля Ю. И., Червов В. Г., Бугай Ю. П. Математические модели простых рецептивных полей зрительной коры. Сб. «Проблемы бионики», вып. 7. Изд-во Харьковск. ун-та, 1971, с. 48—53.
4. Марко Н. Die Systemtheorie des homogenen Schichten, I. Mathematische Grundlagen. «Kybernetik», 5, 6, s. 221—240.

О ВОЗМОЖНОЙ РОЛИ «МАГНИТНЫХ» СВОЙСТВ В КОДИРОВАНИИ НАСЛЕДСТВЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ

В. В. Морозов

Материальным носителем наследственной информации является молекула дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК). При этом определенной последовательности из трех нуклеотидов, входящих в молекулу ДНК (генону), строго соответствует тройка нуклео-

тидов (кодон) в молекуле информационной рибонуклеиновой кислоты (иРНК). В свою очередь, кодон иРНК обуславливает синтез одной из двадцати аминокислот, из которых синтезируются белки всех живых объектов. Справедливость этих представлений о наследственном коде и способе передачи наследственной информации доказана экспериментально. Однако целый ряд фактов, связанных с кодированием наследственной информации и ее передачей, теоретически недостаточно обоснованы. Например, не ясно,



Рис. 1.

почему избранный природой наследственный код является неравномерно избыточным, а число аминокислот ограничено только двадцатью; почему генон (кодон) состоит из последовательности трех оснований, а не из больших или меньших последовательностей; случайно ли форма молекулы ДНК имеет форму двойной спирали и т. п. Отсутствие ответов на указанные вопросы, по видимому, свидетельствует о том, что рассмотрение лишь химической основы всех состояний и процессов, связанных с кодированием и передачей наследственной информации, является недостаточным.

Постулируя наличие «магнитных» свойств на уровне группы атомов, входящих в состав нуклеотидов, предложим гипотезу, в какой-то мере восполняющую недостаток в обобщениях, а в отдельных своих положениях совпадающую с установленными фактами. Гипотеза основывается на том, что атомы и молекулы, связываясь в комплексы, способны в принципе приобретать свойства, которых они не имели будучи обособленными.

Рассмотрим комплекс из четырех атомов (молекул), изображенных в виде шариков, располагающихся в вершинах тетраэдра (рис. 1). Допустим, что в силу вращательного движения каких-либо элементарных частиц, обслуживающих грани тетраэдра, каждую из граней можно характеризовать вектором-моментом. Из-за полной симметрии тетраэдра энергетически выгодным может оказаться такое состояние его, при котором результирующий вектор-момент всей конструкции равен нулю. Такие «уравновешенные» по моментам тетраэдры могут быть двух типов — *a* и *b* (рис. 1).

При объединении двух «уравновешенных» тетраэдров в конструкцию (рис. 2) последняя будет обладать результирующим вектором-моментом (при объединении тетраэдров *a* и *b*) либо

вектор-момент окажется равным нулю (объединения a и a , b и b). Результирующий вектор-момент полностью определяется состоянием внутренней грани данной конструкции и поэтому может быть приписан только этой грани. Конструкцию из совмещенных тетраэдров назовем информационной ячейкой. Представим ее в виде магнитника, который намагничен ($M = 1$) или размагничен ($M = 0$). Заметим, что информационные ячейки (рис. 2) образуются при плотной укладке не менее трех слоев одинаковых атомов шариков.

Из информационных ячеек могут собираться различные фигуры. Одна из них показана на рис. 3. В этой фигуре узлы A и A_1 , B и B_1 , расположены слишком близко. Поэтому в них нельзя поместить атомы или молекулы-шарики, аналогичные расположенным в других узлах. Если же считать, что атомы или молекулы-шарики находятся в щели между указанными узлами, то, наоборот, расстояние между ними и прочими узлами окажется значительным, поэтому такое



Рис. 2.

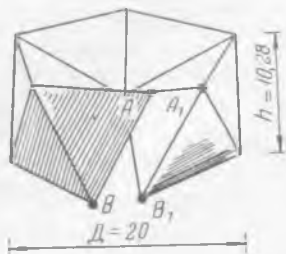


Рис. 3.

положение будет неустойчивым. Удаляя из конструкции (рис. 3) узлы A и A_1 , B и B_1 , получим «устойчивую» конструкцию (рис. 4). В ней можно различить пять информационных ячеек (по числу внутренних граней). В связи с этим данную конструкцию назовем информационной секцией. Из информационных секций может быть составлен столбик (рис. 5), геометрические особенности которого будут точно соответствовать аналогичным особенностям молекулы ДНК.

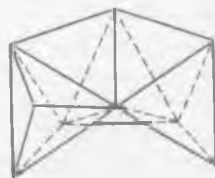


Рис. 4.

Расчеты в относительных единицах показывают, что при одинаковых диаметрах столбика* и молекулы ДНК, высота h информационной секции точно равна 10,28, т. е. размеру, занимаемому тройкой нуклеотидов в молекуле ДНК (рис. 3). Расстояния между спиралями, проведенными в направлении векторов-моментов крайних информационных ячеек секции, будут достаточно точно соответствовать расстоянию между спиралями молекулы ДНК и т. д. Это совпадение геометрических размеров простейшей конструкции и сложной молекулы ДНК позволяет считать конструкцию, собранную из информационных секций, моделью молекулы ДНК. В связи с этим совпадением можно предположить, что появление «магнитных» свойств на уровне геометрических

* Им в данном случае является средний диаметр между диаметрами цилиндров, описанных вокруг секции и вписанных в нее.

размеров информационной секции является тем фактором, который обуславливает использование именно тройки нуклеотидов в качестве слов языка наследственности. Последнее представляется логичным, ибо размерам участка молекулы ДНК, отвечающим последовательности из двух букв (АТ, ГТ, АТ и т. д.) не может соответствовать ни одна информационная ячейка и, следовательно, «магнитные» свойства.

Рассмотрим возможности «магнитного» кодирования. В информационной секции (рис. 4) можно различить пять информационных ячеек (по числу внутренних граней секции). Вектор-момент каждой информационной ячейки имеет значение 1 либо 0 и, кроме того, характеризуется направлением. Поэтому «магнитное» состояние каждой секции

может быть записано тремя символами $\begin{vmatrix} N \\ S \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} S \\ N \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \end{vmatrix}$,

располагаемыми на пяти местах, например, $\begin{vmatrix} N \\ S \end{vmatrix} \begin{vmatrix} S \\ N \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \end{vmatrix}$ -

$\begin{vmatrix} 0 \\ 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} S \\ N \end{vmatrix}$, где $\begin{vmatrix} N \\ S \end{vmatrix}$ и $\begin{vmatrix} S \\ N \end{vmatrix}$ указывают на наличие вектора-момента в соответствующей информационной ячейке

и отражают направление этого момента. Символ $\begin{vmatrix} 0 \\ 0 \end{vmatrix}$

свидетельствует об отсутствии вектора-момента. В указанной записи начальный $\begin{vmatrix} S \\ N \end{vmatrix}$ и конечный $\begin{vmatrix} N \\ S \end{vmatrix}$ символы

соответствуют информационным ячейкам, между которыми располагается щель информационной секции. Если

упомянутой секции предоставить возможность занимать любое положение в пространстве (растворе), то секции, обозначаемые



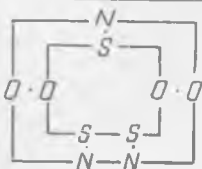
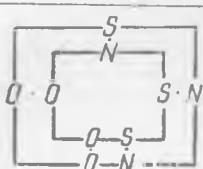
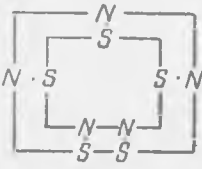
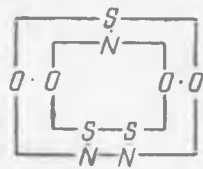
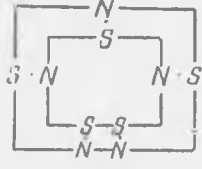
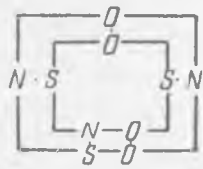
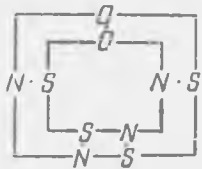
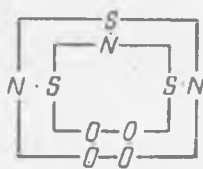
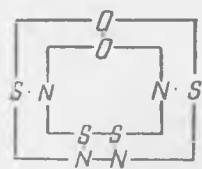
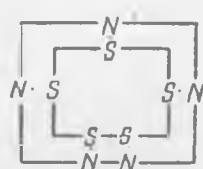
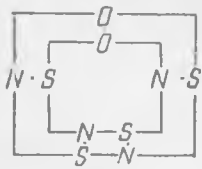
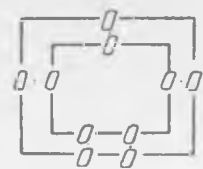
Рис. 5.

$\begin{vmatrix} N \\ S \end{vmatrix} \begin{vmatrix} S \\ N \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} S \\ N \end{vmatrix}$, $\begin{vmatrix} S \\ N \end{vmatrix} \begin{vmatrix} N \\ S \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} N \\ S \end{vmatrix}$, $\begin{vmatrix} S \\ N \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} S \\ N \end{vmatrix} \begin{vmatrix} N \\ S \end{vmatrix}$, $\begin{vmatrix} N \\ S \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} N \\ S \end{vmatrix} \begin{vmatrix} S \\ N \end{vmatrix}$.

не будут различаться друг от друга, так как в свободно «плавающей» в пространстве секции нельзя отличить верх и низ, а также правую и левую стороны. Поэтому число различных «магнитных» состояний секции окажется равным 70. Допустим, что каждая информационная секция способна (рис. 6, а) формировать на своей поверхности (или в щели) «магнитное» сообщение-цепочку, состоящую из трех символов, которыми записывается «магнитное» состояние информационной секции. Сообщения-цепочки записываются аналогично «магнитным» состояниям информационной секции, и число их, естественно, окажется равным 70.

Поскольку сообщения-цепочки формируются на участке молекулы ДНК, размеры которого соответствуют размерам, занимаемым тройкой нуклеотидов, т. е. геномом (кодоном), их можно назвать «магнитными» генонами (кодонами). Число «магнитных» генонов (70) больше количества «химических» (64).

Номер матрицы	Матрица	Число составляющих	Номер матрицы	Матрица	Число составляющих
1		3	6		5
2		3	7		5
3		3	8		3
4		3	9		3
5		3	10		3

11		3	17		5
12		3	18		3
13		3	19		5
14		3	20		3
15		3	21		7
16		3	22		1

Как 70 «магнитных» генов (кодонов) могут кодировать 20 аминокислот? Не является ли избыточным и «магнитный» код?

Если представить (рис. 6, а, б), что сформированное на ДНК «магнитное» сообщение-цепочка, попадая в раствор, сшивается своими концами или формируется и сшивается концами непосредственно в щели информационной секции, то из 70 «магнитных» генов (кодонов) могут образоваться всего лишь 22 колечка-сообщения (рис. 6, б) названные нами кольцевыми матрицами (таблица). Если каждую из кольцевых матриц сопоставить с одной

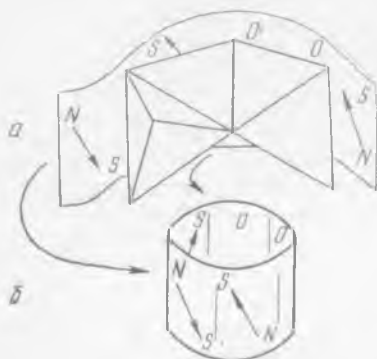


Рис. 6.

из аминокислот, то число разных аминокислот, которые могут быть однозначно закодированы «магнитным» кодом, будет равно 22. Это уже достаточно близко к 20 аминокислотам, из которых синтезируются белки живых объектов. Однако число 22 может быть скорректировано. Для этого обратим внимание на кольцевые матрицы № 21, 22 (таблица). Матрица № 22 вообще не обладает «магнитными» свойствами и поэтому может выполнять только функцию разделительного знака в «магнитном» кодировании (аналог точки, тире, запятой и т. д.). Матрица № 21, хотя и может являться кодовым «словом» в магнитной записи, по своему «внутреннему содержанию» больше похожа на «магнитную присоску», роль которой может заключаться в перемещении в определенном направлении фрагментов молекул, сцепленных с ней, или в присоединении этих фрагментов к другим объектам. В связи с только что сказанным число аминокислот, равное 20, может рассматриваться как естественное следствие «магнитного» кодирования аминокислот.

Кольцевые матрицы «собираются» из различного количества «магнитных» генов (кодонов). Число, показывающее, из какого количества «магнитных» генов собирается каждая матрица, приведено рядом с ними в таблице. Указанное является также естественным следствием сворачивания «магнитных» сообщений-цепочек в колечки, вследствие чего из разных сообщений-цепочек образуются одинаковые кольцевые матрицы.

ВЫВОДЫ

1. Вектор-момент, появляющийся на уровне информационной ячейки, может рассматриваться как дополнительное свойство, играющее существенную роль в наследственном кодировании.

2. Предполагаемая гипотеза позволяет просто и логично связать возможности «магнитного» кода с 20 кодируемыми с его помощью аминокислотами, оставляя при этом в резерве два «магнитных» кодона для функций разделения, присоединения или ориентации.

3. Из гипотезы следует неравномерность распределения «магнитных» кодонов» (генонов) по отдельным аминокислотам.

4. Появление «магнитных» свойств возможно лишь на уровне информационной ячейки (три слоя «узловых» атомов), что обуславливает геометрические размеры кодовых слов (генонов, кодонов) и количество содержащихся в них оснований.

Природа вектора-момента гипотетически сопоставляется с магнитным моментом вследствие того, что, по-видимому, магнитные свойства могут быть присущи природе на разных уровнях ее организации.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ФОРМАЛИЗАЦИЯ СТРУКТУР ПАТОЛОГИЧЕСКОГО МЫШЛЕНИЯ

В. Н. Чудаков

На основании экспериментального материала по формированию структур мышления и его нарушений в данной работе сделана попытка выявить основные черты патологического мышления, сформулировать его аксиомы и рассмотреть нарушения логико-алгебраических свойств формального и конкретного уровня мышления. Наряду с этим рассмотрено нарушение физического механизма, осуществляющего процесс логического мышления.

Выясним, составляют ли явления нарушений мышления некое целое (т. е. обязаны ли они своим существованием ряду случайных и отрывочных причин, не имеющих связи между собой, или они образуют связанное структурированное целое), представляя, таким образом, свою особую логику — логику патологического мышления.

Основные черты патологического мышления

Обобщение материала по формированию структур мышления в детском возрасте, а также по деградации сформировавшегося мышления взрослых в результате нейропсихических заболеваний [1—5] позволяет выделить основные черты патологического мышления.

Эгоцентрическая (символическая мысль). Мышление в целом можно разбить на нормальное, подчиняющееся аксиомам формальной логики, и патологическое, подчиняющееся аксиомам алогички.

Нормальному и патологическому мышлению соответствуют два типа мысли: направленная, или разумная, имеющая целью понимание, и ненаправленная (хаотичная), или эгоцентрическая, не имеющая целью понимание. Разумная мысль сознательна, приспособлена к действительности и стремится воздействовать на него; она заключает истину или заблуждение (истину эмпирическую или логическую). Эгоцентрическая мысль подсознательна. Она преследует задачи, которые не представляются сознанию, не

приспосабливается к действительности, а сама создает воображаемую действительность, стремится не к установлению истины, а к удовлетворению желания и остается чисто индивидуальной.

Эгоцентрическая мысль имеет свою координатную систему отсчета (систему своего «Я») и не может преобразовываться или становиться на другие точки зрения (другие «Я»). Более того, любую другую точку зрения она трансформирует в свою.

Пусть E — полуметрическое пространство — множество, наделенное полуметрикой d , которая представляет собой вещественную функцию на $E \times E$ такую, что $d(x, x) = 0$; $d(x, y) = d(y, x) \geq 0$; $d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, y)$ для любых x, y, z из E [6]. Отображение $U: E \rightarrow E$ называется сжимающим отображением пространства E , если существует такое число k ($0 \leq k \leq 1$), что $d(U(x), U(y)) \leq kd(x, y)$ для любых $x, y \in E$. Всякое сжимающее отображение непрерывно [6].

Сформулируем теорему об эгоцентрическом преобразовании.

Теорема 1. Пусть (E, d) — полное полуметрическое пространство точек зрения и U — такое непрерывное отображение E в себя, что для некоторого натурального числа α отображение U^α является сжимающим. Тогда существует, по крайней мере, одна точка зрения $x \in E$, удовлетворяющая условию

$$d(U(x), x) = 0. \quad (1)$$

Если $y \in E$ — другая точка зрения, такая, что $d(U(y), y) = 0$, то $d(x, y) = 0$.

Доказательство. Чтобы доказать существование элемента $x \in E$, удовлетворяющего условию (1), рассмотрим случай $\alpha = 1$ (когда само отражение U — сжимающее). Возьмем произвольную точку $x_0 \in E$ и определим последовательность (x_n) с помощью рекуррентного соотношения $x_n = U(x_{n-1})$, где $n = 1, 2, \dots$

Для любых чисел n и m имеем

$$d(x_{n+m}, x_n) = d(U^{n+m}(x_0), U^n(x_0)) \leq k^n d(x_m, x_0)$$

и

$$d(x_m, x_0) \leq d(x_m, x_{m-1}) + \dots + d(x_1, x_0) \leq k^{m-1}d(x_1, x_0) + \dots + d(x_1, x_0) \leq (1 - k)^{-1}d(x_1, x_0),$$

откуда следует, что $d(x_m, x_n) \leq k^n(1 - k)^{-1}d(x_1, x_0)$, где $k < 1$, так как отображение U — сжимающее. Тогда (x_n) — последовательность Коши, которая в силу полноты E сходится к некоторой точке $x \in E$. Однако в этом случае последовательность $U(x_n) = (x_{n+1})$, будучи подпоследовательностью последовательности (x_n) , также сходится к x . В силу непрерывности отображения U $U(x_n) \rightarrow U(x)$ следует уравнение (1).

Перейдем к случаю, когда отображение $V = U^\alpha$ является сжимающим. Рассуждая аналогично, получаем, что существует точка $x \in E$, для которой $d(V(x), x) = 0$. Для последовательности $x_n = V^n(x_0)$ справедливы равенства $U(x_n) = U(V(x_{n-1})) = V(U(x_{n-1}))$.

Так как $x_n \rightarrow x$ и отображения U, V непрерывны, $d(U(x), V(U(x))) = 0$. Но тогда $d(U(x), x) < d(U(x), V(U(x))) + d(V(U(x)), V(x)) + d(V(x), x) = d(V(U(x)), V(x)) \leq kd(U(x), x)$, откуда в силу условия $k < 1$ вытекает равенство $d(U(x), x) = 0$.

Докажем вторую часть теоремы. Для этого заметим, что равенство (1) означает $U(x) \in \overline{\{x\}}$ (замыкание множества). Отсюда, а также из непрерывности отображения U вытекает $U^2(x) \in U(\overline{\{x\}}) \subset \overline{\{U(x)\}} = \overline{\{x\}}$. По индукции получаем $U^n(x) \in \overline{\{x\}}$. Аналогично $U^n(y) \in \overline{\{y\}}$, следовательно, $d(x, y) = d(U^n(x), U^n(y)) \leq kd(x, y)$. Отсюда $d(x, y) = 0$.

Следствие. Множество неподвижных точек зрения $N \in E$ данного отображения U представляет собой область собственных точек зрения.

Основная функция эгоцентрической мысли заключается в том, чтобы дать нуждам и интересам индивида медленное удовлетворение желания, деформируя при этом физическую и социальную действительность. Такая мысль не знает той действительности, которая является всеобщей, разрушает иллюзии и принуждает к проверке, — она знает свою сугубо индивидуальную [2—5].

Основная функция разумной мысли заключается в общезначимости, взаимном контроле (проверяется и доказывается посредством формальной логики), сама мысль направляется на объективную действительность.

Логическое мышление есть результат социального общения индивидов. Поэтому если человек отказывается мыслить социально, то его мышление становится патологическим: с одной стороны, теряет логическую структуру и утрачивает контакт с социальной средой — с другой [7, 8].

Неспособность к синтезу. Она проявляется в восприятии вещей непосредственно, без всякого порядка и организации, в тенденции ставить рядом логические классы и предложения, не устанавливая их точной иерархии. Неспособность к синтезу и непонимание отношения части к целому будем называть соединительной конструкцией или соположением, т. е. помещением рядом фактов и предложений без всякой логической связи [2, 3, 5].

Пусть имеется пространство продукции мышления K_1 и непрерывное отображение $f: K_1 \rightarrow K_1$. Тогда справедлива

Теорема 2. *Для осуществления процесса мышления соположения элементов мыслительной продукции необходимо и достаточно, чтобы операция мышления f переводила пространство K_1 в его ядро:*

$$K_1 \rightarrow \text{Ker} K_1.$$

Доказательство.

Необходимость. Пусть $f: K_1 \rightarrow \text{Ker} K_1$. Это значит, что все элементы, принадлежащие K_1 , склеиваются в один элемент.

А это не что иное, как явление соположения элементов мышления. Следовательно, $f: K \rightarrow \text{Ker}K$.

Достаточность. Пусть f осуществляет отображение K_1 в K_1 и известно, что это отображение соположения. Следовательно,

K_1 является ядром K_1 , т. е. $K_1 = \text{Ker}K_1$.

Синкретизм. На основании соположения можно сделать вывод, что у человека с нарушенным мышлением при восприятии окружающего мира создается впечатление хаоса и несвязности последнего. Это не совсем так. Недостаток объективных связей больной восполняет избытком субъективных связей. Данный факт, являющийся противоположностью соположения и вместе с тем дополняющий его, называется синкретизмом [5]. Сущность синкретизма мышления заключается в том, что представления появляются в форме глобальных и субъективных схем, не отвечающих аналогиям или причинным связям, которые могут быть проверены на опыте. Синкретизм мышления позволяет все связывать во всем, все доказывать благодаря непредвиденным сближениям и связям [2]. Следствием синкретизма является невозможность анализа, дедуктивного рассуждения и тенденция к доказательству любой ценой.

Трансдукция. Патологическое мышление не знает логики отношений [5], логическое умножение и сложение ему чужды, а разнообразные связи, создаваемые синкретизмом, по сути, глобальны и не поддаются анализу. Можно заключить, что рассуждения не являются ни индивидуальными, ни дедуктивными, но трансдуктивными. Действительно, эгоцентрическая мысль не оперирует расширяющейся индукцией и обращением к дедукции, с помощью которых можно было бы доказывать единичные посыпки. Подобное рассуждение идет от единичного к единичному и, следовательно, не достигает логической необходимости. Основной чертой трансдукции является отсутствие в ней логической необходимости. Данное свойство является также следствием того, что мышление не испытывает нужды в доказательстве. Оно не связывает свои суждения необходимыми связями [2].

Нечувствительность к противоречию. Она основывается на понятии необратимости. Необратимость связана с нарушением обратимости логико-алгебраических операций [8]. Посредством обратимых операций можно возвращаться к исходным посылкам. В патологическом мышлении обратимость мыслительных операций утрачена, и она не может удержать предпосылку «умственного опыта», равную самой себе. Отсутствует также способ определения того, изменилась ли сама посылка в процессе мышления. Необратимость суждения вытекает из синкретизма, который позволяет связывать все со всем и препятствует разбиениям и различениям, необходимым для аналитического мышления.

Модальность патологического мышления. Она заключается в существовании нескольких плоскостей действительности, по кото-

рым мышление движется. В зависимости от состояния мышление может находиться в присутствии двух действительностей, одинаково реальных, из которых ни одной не удастся вытеснить другую. Следствием является бессвязность поведения и отсутствие подчинения (иерархии) между состояниями верования и игры [2]. Разумное мышление требует подчинения и внутреннего единства различных плоскостей действительности: реальной плоскости, плоскости возможного и плоскости фикций. Следовательно, подчинение плоскостей действительности определяется степенью их объективности, а способность к объективации зависит от степени эгоцентричности мысли. Другое свойство модальности патологического мышления заключается в том, что оно замкнуто в пределах своего «Я» и не может стать на точку зрения других «Я». Это делает неопределенной границу между объективным и субъективным. Таким образом, патологическое мышление оперирует двумя или несколькими реальностями, действительными поочередно, вместо того чтобы находиться в иерархическом подчинении.

Неспособность к формальному рассуждению. Формальное рассуждение означает, что принимаемые посылки не требуют своего обоснования. Уверенность в заключениях таких рассуждений будет мотивироваться только формой дедукции. Формальное рассуждение для людей с нарушенным мышлением невозможно в силу того, что они не делают различий между возможным и необходимым.

Предпричинность. Существенной ее чертой является неумение различать физическую причинность и логически или психологически обосновывать наблюдаемые явления. В эгоцентрической мысли отсутствует понятие случая. Поэтому, принимая во внимание синкретизм, можно сделать вывод о том, что все может быть оправдано произвольным образом. Это и есть предпричинность [2, 5].

Аксиоматика патологического мышления

Аксиома эгоцентризма. Существует одна система координат, связанная с собственным «Я» и не обладающая возможностью переходить в системы координат других «Я».

Аксиома трансдукции. Рассуждение следует от единичного элемента мыслительной продукции к единичному с отсутствием необходимой для мышления логической связи:

$$a \rightarrow b$$

(a, b — единичные элементы множества мыслительной продукции M).

Аксиома универсальной связи (склеивания). Любой элемент множества мыслительной продукции связывается (сополагается) с любым элементом этого же множества.

Представления формируются в форме глобальных и субъективных схем, не соответствующих причинным связям, которые могут быть проверены.

Эта аксиома характеризует синкретизм патологического мышления.

Аксиома необратимости. Операции патологического мышления необратимы.

Аксиома символической причинности. Операции патологического мышления исключают элемент случайности.

Патологическое мышление исключает логическое или психологическое обоснование физической причинности.

Все может быть обосновано произвольным образом.

Аксиома регрессии. Продукт патологического мышления становится все менее инвариантным по отношению к изменяющимся условиям относительно свойств наблюдаемых предметов.

Аксиома целостности. Операции патологического мышления связаны в целостные образования — структуры.

Источником патологических структур мышления являются:

а) искаженное пространство социальных взаимодействий;

б) материальные травмы мозга;

в) функциональные расстройства нейронных структур.

Расширим понятие обычной формальной логики. Под логикой будем понимать совокупность навыков, применяемых умом при общем ведении операций мышления.

Совокупность перечисленных выше аксиом патологического мышления образует его логику, которую назовем алогикой.

Свойства алогики:

1. Она более интуитивна, скорее «синкретична», чем индуктивна и дедуктивна. Ее рассуждения не явно выражены и от первых посылок переходят прямо к выводам, минуя этапы [2, 5];

2. Она почти не останавливается на доказательствах и контроле предложений, а своим представлениям сообщает категоричное чувство уверенности и безошибочности [3, 4].

3. Она используется личными схемами по аналогии, воспоминаниями о предшествующих рассуждениях, которые оказывают смутное влияние на направление последующих рассуждений.

4. В ней значительную роль играют зрительные схемы, которые часто замещают доказательство и служат опорой дедукции.

5. Она порождает неустойчивость и неопределенность мышления.

Алогическая деятельность мышления ведет к утрате необходимости более оптимального приспособления к окружающей среде и фильтрации ложных мыслей и объяснений при общении с другими [4]. Отсюда проверка и доказательство своих мыслей становятся излишними.

Потеря алгебраических свойств сформировавшихся структур мышлением

Обратимость является необходимым и достаточным условием процесса логического мышления [9]. Существуют две формы обратимости, которые обуславливают алгебраические свойства структур мышления.

Формирование инвариантов, понятий, сохранение свойств упорядочения и образования множества логических возможностей связано со свойством обратимости. Обратимость мышления характеризуется обратимостью умственных операций над классами и отношениями. На уровне структур мышления конкретного уровня алгебраические свойства также проявляются отдельно друг от друга. На уровне структур мышления формального уровня синтезируются обе формы обратимости.

Нарушение алгебраических свойств мышления формального уровня связано с утратой операции преобразования обращения N . При этом разрушаются все структуры формального уровня, и мышление утрачивает дедуктивный характер. Нарушение алгебраических свойств конкретного уровня обусловлено потерей обратимости и ассоциативности операций. В результате патологическое мышление утрачивает способность к построению классификаций и сериаций [9].

Таким образом, патология логического мышления связана с нарушением первой и второй форм обратимости. Нарушение первой формы связано с исчезновением групповых свойств мышления. Оно теряет способность к построению инвариантов, понятий, сохранений, соответствий. Нарушение второй формы обратимости обуславливает потерю свойств структур порядка. Мышление становится неспособным строить упорядоченные множества, выяснять логические возможности. Нарушение одновременно двух форм обратимости ведет к утрате гипотетико-дедуктивного характера мышления.

Безэнтропийность и нарушение процесса логического мышления

В силу второго закона термодинамики, в природе нет обратимых процессов. Однако процесс логического мышления не подчиняется этому закону. Процесс логического мышления физически является безэнтропийным [10]. Осуществление физико-химическими структурами логического процесса мышления должно удовлетворять термодинамическим условиям

$$T = 0; H_{k(\text{мол})} = 0,$$

где H_k — энтропия информации k -го сорта «частиц-шансов». Это отвечает условиям полного освобождения процесса логического мышления от молекулярной статистики.

Термодинамический анализ показывает, что логическое мышление связано с нарушением баланса обобщенной энтропии. Энтропийные физико-химические преобразования мозга ($H_{\text{п.мозга}} > 0$)

способны давать безэнтропийные мыслительные преобразования (продукции) $H_{п.мысл} = 0$). Для разрешения этого парадокса Н. И. Кобозевым был предложен антиэнтропийный механизм, который восстанавливает баланс энтропии при логическом мышлении. Именно этот механизм и определяет физически безэнтропийность мышления [10].

Преобразование мышления, лишённое противоречия, обратимо. Физически это означает, что соответствующие физико-химические преобразования безэнтропийны, т. е. не подвержены броунизации. Связь между безэнтропийностью и обратимостью процесса логического мышления состоит в следующем. Отсутствие обратимого преобразования мышления ведет к противоречивым неоднозначным выводам и доказательствам. Физически это значит, что операции мышления броунизированы, т. е. они не являются безэнтропийными и подвержены молекулярной или системной статистике. Таким образом, общими условиями осуществления мозгом процесса логического мышления являются безэнтропийность и обратимость. Безэнтропийность характеризует физические условия процесса логического мышления, обратимость — формальные (математические). Патология логического мышления связана с нарушением двух форм обратимости — инверсии и реципрокности [8, 9]. Нарушение обратимости связано с исчезновением групповых свойств структур порядка мышления. Мышление теряет способность к построению инвариантов, понятий сохранения, соответствий, упорядоченных множеств, к выяснению логических возможностей. Физически нарушение процесса логического мышления связано с утратой безэнтропийности, т. е. с нарушением антиэнтропийности механизма. Конкретно исследовать нарушения логического мышления — значит разработать тесты, обнаруживающие потерю обеих форм обратимости мышления, с которыми связаны утрата построения инвариантов, понятий сохранения, упорядоченности множества объектов и множества логических возможностей. Так как процесс логического мышления является безэнтропийным, повышение энтропии продукта мышления связано с функциональным расстройством нейронных структур мозга и с нарушением работы антиэнтропийного механизма.

ЛИТЕРАТУРА

1. Братко А. А. и др. Моделирование психологической деятельности. М., «Мысль», 1969. 355 с.
2. Зейгарник Б. В. Патология мышления. Изд-во Московск. ун-та, 1962. 244 с.
3. Зейгарник Б. В. Введение в патопсихологию. Изд-во Московск. ун-та, 1969. 162 с.
4. Александров Ю. А. Человек побеждает безумие. М., «Сов. Россия», 1968. 150 с.
5. Пиаже Ж. Речь и мышление ребенка. М.—Л., Госучпедгиз, 1932. 411 с.
6. Эдвардс М. Введение в функциональный анализ. М., «Мир», 1971. 239 с.
7. Блейер Е. Аутистическое мышление. Одесса, 1927. 81 с.

8. П и а ж е Ж. Избранные психологические труды. Психология интеллекта. Генезис у ребенка. Логика и психология. М., «Просвещение», 1969. 659 с.

9. Ч у д а к о в В. Н. Алгебраическая природа структур формирующегося мышления. Сб. «Проблемы бионики», вып. 10. Изд-во Харьковск. ун-та, 1973. с. 49—57.

10. К о б о з е в Н. И. Исследование в области термодинамики процессов информации и мышления. Изд-во Московск. ун-та, 1971. 196 с.

К ВОПРОСУ О ЕДИНИЦАХ РЕШЕНИЙ ПРИ ВОСПРИЯТИИ ВЕРБАЛЬНОГО МАТЕРИАЛА

М. М. Гохлернер, П. Б. Невельский

Одной из важнейших задач при автоматическом распознавании речи является исследование единиц решений, т. е. того, после каких отрезков текста субъект приходит к решению о значении лингвистических элементов (звуков, букв) воспринятого отрезка, приписывая им определенное соответствие внеязыковому содержанию на основании образов, извлекаемых из постоянной памяти.

От разрешения данной проблемы зависит объем устройства в технических системах распознавания речи и машинного перевода.

Дж. Миллер [1] высказал предположение, что наибольшая надежность распознавания речи могла обеспечиваться в том случае, если бы единицами восприятия являлись максимально крупные последовательности лингвистических элементов на уровне предложения или синтагмы. Нецелесообразность принятия текущих решений о более мелких элементах речи объясняется следующим: принятие решения означает сокращение информации, что сопряжено с ошибками. Однако данное допущение нереально, так как требует хранения в постоянной памяти всего набора возможных предложений [2].

Предложение распознается не посредством идентификации его с образом, хранимым в постоянной памяти, а путем лингвистического анализа. Но для этого в процесс восприятия речи должно быть включено текущее принятие решений о более мелких смысловых различимых единицах.

Исследования показали, что в том случае, когда единицей решения является слово, также можно получить грамматически правильную фразу [3]. Эксперименты по восприятию фраз и слов различной длины [4] позволяют утверждать, что человек принимает решение о словах, не дожидаясь окончания всей фразы, хотя, с другой стороны, не все слова узнаются по мере их поступления: возможно и отсроченное решение о неузнанном слове, если длина фразы не превышает емкости оперативной памяти. Опыты с тахистоскопическим предъявлением различных последовательностей осмысленных и неосмысленных триграмм на уровне слогов и слов [5] дают основание предполагать, что путем установления корреляционных зависимостей между порогом

распознавания и частотностью различных лингвистических элементов можно установить минимальный отрезок принятия решений. Если про- они принимаются на уровне слова, то порог распознавания триграмм, которые могут быть словами и не словами (морфемами, типа „ряд“, „нос“, прогнозируется вероятностью (частотностью) их появления в качестве самостоятельных слов, а не буквосочетаний. Если же триграммы не могут выступать в роли самостоятельных слов типа „сво“, „ост“, то вероятность (частотность) их появления не прогнозирует порог их распознавания. На основании полученных результатов авторы работы [5] приходят к выводу о том, что единицей принятия решения при зрительном восприятии текста является именно слово, а не единицы, которые имеют меньше слов.

Для выявления порога распознавания в целях установления единиц решений при восприятии речи применялась методика педетемех [6]. В результате автор пришел к выводу о том, что в связи с постоянным изменением условий восприятия слышимой речи (в результате окружающего шума, различной четкости артикуляции говорящего и темпа речи) постоянной единицы решения не существует: ее изменение обусловлено восприятием необходимых и достаточных признаков слова, а также местоположения определяющих слов контекста, т. е. таких, которые позволяют предсказывать возникновение тестируемого слова. Вторым выводом к которому пришел автор, заключается в следующем: при отсеченных решениях выдвигаются предварительные гипотезы на различных уровнях (дифференциальных признаков фонем, морфем слова) или вообще не принимаются решения.

Целью нашего исследования было выявление характера единицы решения при зрительном восприятии текста, когда последний ограничен только левой частью, т. е. когда субъект воспринимает последовательность букв, не зная следующей цепочки. Решение в этом случае принимается на основании неполной информации и незнания структуры лингвистической или семантической задачи, т. е. в структурах вероятностного характера. Основной проблемой, которую при этом следует разрешить, является зависимость единицы решения от субъективной неопределенности элементов текста для данного испытуемого (И).

Методика. В качестве экспериментального материала был отобран текст (описание осеннего леса) из книги В. Пескова «Шаги по росе» [7], состоящий из 230 слов (23 предложений).

В испытаниях участвовал 12 студентов первого курса физико-математического факультета Харьковского пединститута. Была использована одна из модифицированных шенноновских методик угадывания букв [8] текста, с помощью которых измеряется неопределенность последнего. Данная методика отличается от хорошо известного метода угадывания Шеннона [9] тем, что энтропия текста рассматривается как ненадежность угадывания, т. е. как информация, которая не может быть извлечена из текста. Решение

ГОВ
ЛН
ЭИ
АН
Ю
ЧЕ
ГО
ТЬ
Ю
К
ЭМ
ДЕ
ЛЯ
Э
И
И
Г
Т

о продолжении незнакомого текста принимается на основании информации, извлеченной из предшествующего текста, и информации, которая переводится из постоянной памяти в оперативную в зависимости от частоты совместной встречаемости соответствующих лингвистических элементов в прошлом опыте субъекта.

Сущность этой методики заключается в том, что после озвучивания И с некоторым количеством знаков текста (30—50 букв) он побуквенно предсказывает продолжение текста. Угадывание проводится на уровне букв. После каждой правильно или неправильно предсказанной буквы И получает подкрепление от экспериментатора в виде требуемого решения, т. е. в виде буквы, фактически появляющейся в данном месте текста. Таким образом, процесс принятия решения носит управляемый характер, он детерминируется подсказками экспериментатора, и существует возможность точно фиксировать границу последовательностей букв, после которых принимаются правильные решения о вербальном элементе (морфеме, слове, предложении), т. е. установить, когда имеются все необходимые и достаточные признаки для того, чтобы принять правильное решение. Так как на принятые решения о каждом отдельном вербальном элементе текста влияет вся информация предыдущего текста, важно было создать правильную исходную установку. Поэтому И ознакомился с большим отрывком из начала текста (270 букв), в котором была намечена основная тема: лес осенью, человек любит осеннюю природу. Часть этого отрывка, состоящая из 181 слова (1000 знаков) — 17 предложений, служила для обучения технике эксперимента. Время на угадывание каждой буквы составляло 20 сек.

При обычной процедуре угадывания И в своих протоколах (протокол А) фиксировали текст побуквенно, перечеркивая ложные гипотезы (буквы) и надписывая сверху правильные буквы в соответствии с подсказкой экспериментатора, так что перед каждым новым принятием решения о продолжении текста в распоряжении И была вся предшествующая часть текста. Кроме этой процедуры, И вели еще второй протокол (протокол Б), в который заносились все возникшие в голове гипотезы на любом уровне (буква, буквосочетание, слово, словосочетание) до принятия решения о букве, требуемой в данном месте текста.

Записи из протоколов А сводились в матрицу частот, в которой отражена частота букв текста и частота их появления в ответах испытуемого. Матрица обрабатывалась по формуле субъективной неопределенности

$$H_{\text{sub}} = \frac{1}{N} \left[\sum n_j \log_2 n_j - \sum n_{ij} \log_2 n_{ij} + 0,721 (f_i - f) \right], \quad (1)$$

где N — общее число решений; n_j — частота появления j -й буквы в ответе И; n_{ij} — частота совместного появления i -й буквы текста и j -й буквы ответа; f — значение числа степеней свободы, т. е.

число заполненных клеток матрицы (f_{ij}) и ответов (f_j) минус единица; $0,721$ — значение $\frac{1}{2(\log_e 2)}$, где e — основание натурального логарифма.

Полученные результаты показывают, какое количество информации в двоичных единицах содержит в среднем одна буква текста для данного И. Чем меньше субъективная неопределенность, тем больше предсказуемость букв данного текста для данного И. Выявление степени предсказуемости позволяет сравнивать процесс поиска решения испытуемых, для которых текст обладает различной степенью предсказуемости.

На основании записей в протоколах Б были составлены тексты, включающие все вербальные элементы оригинала, каждому из которых предшествовал вербальный материал, воспроизведенный И в ходе выдвижения гипотез на пути к принятию решения. В этот материал входили гипотезы, которые привели к ложному решению в виде неправильного предсказывания буквы, и те, которые И отбросил в пользу более вероятных. Таким образом, был восстановлен путь поиска решения и установлены границы последовательностей символов, после которых принимаются решения. Результаты исследований представлены в таблице.

Испытуемый	Количество информации H_{sub} , дв. ед. на 1 букву	Избыточность текста, %	Число решений					
			правильных	ложных	гипотетических	ложных в начале слова	ложных в конце слова	
							при его продолжении	при предыдущем окончании
1	2	3	4	5	6	7	8	9
I_1	1,92	61,6	673	327	—	112	9	19
I_2	1,76	64,8	769	229	2	101	9	15
I_3	1,73	65,4	771	231	—	94	9	16
I_4	1,62	67,6	786	214	—	100	5	21
I_5	1,59	68,2	668	332	—	110	6	23
I_6	1,57	68,6	755	245	—	78	7	13
I_7	1,56	68,8	755	225	20	82	7	13
I_8	1,45	71,0	704	283	13	76	9	13
I_9	1,27	74,6	706	284	10	100	7	18
I_{10}	1,20	76,0	878	106	16	56	1	12
I_{11}	1,12	77,6	776	185	39	66	5	11
I_{12}	0,94	81,2	786	151	63	48	5	7
Всего	—	—	9178	2822	153	1023	79	181
В процентах .	—	—	76,5	23,5	0,013	36,2	2,8	6,4

В таблице процент правильных, ложных и гипотетических решений (графы 4—6) вычислен по отношению к общему числу решений, которое составляет 12,153; процент ложных решений в начале и в конце слова (графы 7—9) — по отношению к общему числу ложных решений. Число ложных решений в конце слова разделено на решения, связанные со стремлением продолжить слово, несмотря на то, что оно закончено (графа 8), и на решения, связанные со стремлением преждевременно окончить слово (графа 9). Субъективная избыточность текста (графа 10) подсчитывалась по формуле

$$R = \frac{H_{\text{sub}}}{H_{\text{max}}} \quad (2)$$

как дополнение до единицы относительной неопределенности, т. е. отношение субъективной неопределенности H_{sub} , выраженной количеством информации в двончных единицах на одну букву для данного И, к максимальной неопределенности буквы русского алфавита, которая равняется пяти.

Анализ этих данных дает некоторые представления о путях поиска решений. Всего было принято 76,5% правильных решений, что свидетельствует о том, что исследуемый текст для носителя языка обладает избыточностью в пределах норм избыточности естественного языка; 35% ошибок приходится на начало (наиболее информативную часть) слова, а на его конец — всего 9%.

В большинстве случаев И, еще не обладая всей информацией о слове, правильно предсказывают его окончание, так как решение о его смысле уже было принято раньше, а грамматические форманты, которые большей частью находятся в конце слова, наиболее жестко детерминируются предыдущими компонентами фразы. Это подтверждает высказанное Р. Г. Пиотровским [10] предположение о квантовом характере распределения информации в тексте. Начала слов несут максимум информации, а последние буквы слов и особенно следующие за ними пробелы малоинформативны либо вообще избыточны.

В конце слова ошибки сокращаются на 70% за счет того, что И стремятся раньше закончить слово, так как вся информация о нем уже получена. Лишь в 30% случаев (или 2,8% общего количества ошибок) И не чувствуют окончания слова и стремятся его продолжить. Так, например, после окончания фразы «Одно удовольствие присесть на такую постель после долгой ходьбы» начинается новое предложение со слова «рядом». Большинство И угадали это слово после появления двух букв «ря»; в следующем слове «желтых» 50% И предсказали его после диаграммы «же», остальные — после триграммы «жел». В предложении «Рядом на желтый куэт слетелись погретья какие-то мошки» слово «погретья», выполняющее функцию обстоятельства цели, не очень тесно связано с предыдущим словом «слетелись»; наоборот, постпозиционное положение подлежащего скорее подсказывает здесь

появление подлежащего. Поэтому большинство И предполагало слова «птички», «бабочки», «мошки», но после буквосочетания «погр» многие приняли правильное решение.

Девяносто процентов правильных решений принимается после третьей буквы слова, даже если триграмма не представляет собой значащей морфемы. В тех местах текста, где контекст меньше всего детерминирует продолжение его, т. е. в начале предложения, отмечается наибольшее количество ошибок. Если на 2172 слова (181 слово текста умножено на 12 И) приходится 2822 ложных предположения, что составляет 1,2 ошибки на слово, то на 204 предложения (17 предложений в тексте на 12 И) приходится 515 ошибок, что составляет 2,5 ошибки на слово, т. е. в 2 раза больше, чем на слово внутри предложения.

Информационный анализ матриц, составленных на основании протоколов А, свидетельствует о больших индивидуальных различиях в неопределенности текста для разных И: от 0,94 дв. ед. на букву (I_{12}) до 1,92 дв. ед. (I_1). Сопоставление данных о количестве выдвинутых гипотез у I_{12} и I_1 , на первый взгляд, дает основание для вывода о том, что причиной является разница в количестве гипотез: чем больше гипотез, тем выше неопределенность у И. Это соотношение равно 214 : 327. Однако дальнейший анализ опровергнул данный вывод. И, у которых большие расхождения в H_{sub} , не показывают заметных различий в количестве гипотез. Так I_2 , у которого $H_{sub} = 1,76$ дв. ед., выдвинул только 231 гипотезу, а I_{11} с $H_{sub} = 1,12$ дв. ед. — 224 гипотезы. С учетом того, что все И одного возраста и приблизительно одинаковой подготовки, объяснение большого разрыва H_{sub} у различных И разницей в прошлом опыте не является обоснованным.

Некоторые возможности для объяснений открывает анализ поведения И при переходе от выдвижения гипотезы до принятия решения. У I_{11} и I_{12} , для которых текст обладает избыточностью около 80% (H_{sub} соответственно равно 0,94; 1,12), находим большое количество нереализованных гипотез, т. е. таких, после которых И не принял решения и не поставил букву, а продолжал перебирать другие альтернативы. У I_{12} соотношение выдвинутых и реализованных гипотез составляет 214 : 63, у I_{11} — 224 : 39. В то же время I_1 , I_2 , для которых текст избыточен только на 60% ($H_{sub} = 1,92$ и 1,76 дв. ед. соответственно), вообще не выдвинули нереализованных гипотез. Сразу же после выдвижения гипотеза реализуется в виде выставленной в протоколе А буквы. Это позволяет говорить о большей уверенности этих И в принятых ими, хотя часто и неправильных, решениях из-за невысокой критичности ума и недостаточного развития интуитивного чувства языка [11].

Качественный анализ характера выдвигаемых гипотез показывает, что такие И при выдвижении гипотез не руководствуются семантической макро- и микроструктурой предшествующего текста, исходят не из целостной картины (patterns), а из отдельных раз-

розненных элементов данной структуры. Покажем, как это происходит.

В той части текста, с которой ознакомились И, создавалась установка на восприятие картины осеннего леса. Очутившийся здесь человек выбрал для отдыха солнечную поляну, покрытую толстым слоем пожелтевших листьев. Последним предложением, которое И могли прочитать, было: «Одно удовольствие присесть на такую постель после долгой ходьбы». На букве «х» текст обрывался, и И начинали предсказывать дальнейшее. Большинство из них, для которых текст обладал большой субъективной избыточностью и небольшой субъективной непосредственностью, принимали правильное решение относительно слова «ходьбы», так как исходили из семантической макро- и микроструктуры предыдущего текста. Наоборот, при небольшой избыточности текста И ориентировались не на текст, а на случайные смысловые, иногда даже чисто внешние ассоциации в рамках общей установки. И, лучше ориентировавшиеся в вероятностной структуре текста, в конце предложения чувствовали законченность фразы и начинали следующее предложение или предполагали наличие еще нескольких элементов, органически включавшихся в фразу.

Большое количество правильных гипотез объясняется использованием информации, содержащейся в предшествующем тексте фразы, и воссозданием целостной структуры образа. До 30% выдвинутых гипотез не реализуется, а после перепроверки отбрасывается в пользу более вероятных.

ВЫВОДЫ

1. Чем меньше субъективная неопределенность текста, тем больше принимается правильных решений. Можно полагать, что здесь влияет не столько неопределенность, сколько эвристические способности человека, благодаря которым и снижена субъективная неопределенность в связи с более правильным принятием решений.

2. Эвристический поиск и принятие решения при предсказывании продолжения текста происходят или на уровне семантической и грамматической микро- и макроструктур предыдущего текста, что дает большую вероятность правильных решений, или на уровне ассоциативных, в большинстве чисто формальных связей отдельных элементов, что вызывает значительное количество ложных гипотез.

3. Различная субъективная неопределенность текста, выявленная с помощью предсказывания продолжения его, не всегда свидетельствует о разном уровне сформированности чувства языка. На результаты угадывания влияют и такие личностные качества субъекта, как критичность ума и эвристические способности.

4. Тот, для кого текст имеет большую субъективную неопределенность, полагается в ходе принятия решения исключительно на свою интуицию. Принятые им неправильные решения сопровождаются чувством уверенности в том, что они единственно правильные. Наоборот, тот, для которого текст обладает меньшей неопределенностью, не полагается на первое интуитивное решение, а изучает другие гипотезы, подвергая их сопоставлению и проверке.

5. Единицами решения при зрительном восприятии текста могут являться не только слова и более крупные лингвистические элементы, но и более

мелкие последовательности букв, если предшествующая фраза может служить опорой для предсказывания (особенно в середине и в конце предложения).

6. Единица решения при зрительном восприятии, как это показано для слухового восприятия [6], зависит, по-видимому, от условий протекания этого процесса. В условиях изолированного слова такой единицей считается слово. В условиях контекста единицей решения могут выступать различные лингвистические элементы, включая морфемы и даже такие буквосочетания, которые самостоятельно не представляют собой осмысленных единиц (морфем или слов).

ЛИТЕРАТУРА

1. Miller G. A. Decision units in the perception of speech. «IRE Transactions on Information Theory», 8 (1962), p. 81—83.
2. Миллер Д., Галанер Ю., Прибрам К. Планы и структура поведения. М., «Прогресс», 1965, с. 158—159.
3. Леонтьев А. Психолингвистика и проблемы функциональных единиц речи. В сб: «Вопросы теории языка в современной зарубежной лингвистике». М., «Наука», 1961, с. 163—190.
4. Чистович Л. А. и др. Речь, артикуляция и восприятие. М. — Л., «Наука», 1965. 241 с.
5. Фрумкина Р. М., Василевич А. П., Мацковский М. С. К вопросу о единицах принятия решений при зрительном распознавании элементов текста. «Науч.-техн. информация, сер. 2. Информационные процессы и системы», 1965, № 5, с. 10—11.
6. Исенина Е. И. Контекст и единица решения при восприятии речи. «Вопросы психолингвистики и преподавание русского языка как иностранного». Изд-во Московск. ун-та. 1971, с. 196—211.
7. Песков В. Шаги по росе. М., «Молодая гвардия», 1963. с. 352.
8. Nevelsky P. B. Subjective entropy of a text as equivocation of krediction. «Actes du X Congres international des linguistes», vol. 111. Bucarest, 1970, p. 301—303.
9. Шеннон К. Математическая теория связи. В кн.: К. Шеннон. Работы по теории информации и кибернетике. М., ИЛ, 1963, с. 243—332.
10. Пиотровский Р. Г. Информационные измерения языка. Л., «Наука», 1968, с. 73—75.
11. Гохлернер М. М., Невельский П. Б., Рапопорт И. А. Чувство языка и его измерение. «Материалы Третьего Всесоюзного симпозиума по психолингвистике». М., 1970, с. 98—101.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЧЕЛОВЕКА

Р. А. Гуревич, В. А. Внуков

Метод математического моделирования, применяемый для исследования биологических систем, можно использовать в процессе анализа работы опорно-двигательной системы [1].

При построении математической модели опорно-двигательной системы приходится делать некоторые упрощения, позволяющие формализовать поведение системы. Так, считается, что связи между звеньями системы стационарны и голономны, распределение масс в пределах каждого звена постоянно и не зависит от мышечного напряжения, а силами трения в сочленениях можно пренебречь. Такие упрощения приняты во многих работах. Кроме

Того, при допущении, что система работает в области малых колебаний, производится линеаризация дифференциальных уравнений. Таким образом, линеаризированные математические модели получаются из условий несущественности нелинейностей системы для ее работы, а также из предположения о достаточно малой степени динамических отклонений переменных от некоторых установившихся значений. Использование линеаризированных математических моделей обусловлено прежде всего тем, что позволяет применять довольно хорошо разработанный математический аппарат линейных систем. Однако в процессе исследования устойчивости системы такая идеализация может привести к результатам, отличающимся от поведения реальной системы [2].

В качестве примера рассмотрим устойчивость линейной модели, полученной при анализе двузвенной системы поддержания равновесия [3]. С помощью уравнений Лагранжа движение такой системы можно представить в виде

$$\begin{aligned} a_{11}\ddot{\varphi}_1 + a_{12}\ddot{\varphi}_2 + a_{13}\dot{\varphi}_1 &= -M_2(t); \\ a_{21}\ddot{\varphi}_1 + a_{22}\ddot{\varphi}_2 + a_{23}\cos\varphi_2 \cdot \dot{\varphi}_2 &= M_2(t). \end{aligned} \quad (1)$$

Уравнение установившегося режима

$$\sin\varphi_1 = \frac{a_{23}}{a_{13}} \sin\varphi_2. \quad (2)$$

Тривиальное решение равенства (2) определяет условия устойчивости равновесного состояния.

Исследуем устойчивость системы (1) в предположении, что управляющий момент $M_2(t)$ является функцией только угла отклонения центра системы α_0 , т. е. $M_2(t) = K_1\alpha_0(t)$.

На основании расчета коэффициентов уравнений (1) получим систему [3]

$$\begin{aligned} 7,245\ddot{\varphi}_1 - 1,2\ddot{\varphi}_2 - 76,285\dot{\varphi}_1 &= -K_1(0,952\varphi_1 - 0,148\varphi_2); \\ 1,2\ddot{\varphi}_1 - 2,35\ddot{\varphi}_2 + 11,8\dot{\varphi}_2 &= K_1(0,952\varphi_1 - 0,148\varphi_2). \end{aligned} \quad (3)$$

С введением безразмерного времени эта система принимает вид

$$\begin{aligned} 6,04\ddot{\varphi}_1 - \ddot{\varphi}_2 - \varphi_1 + 0,952F\dot{\varphi}_1 - 0,148F\dot{\varphi}_2 &= 0; \\ \ddot{\varphi}_1 - 2\ddot{\varphi}_2 + 0,154\dot{\varphi}_2 - 0,952F\dot{\varphi}_1 + 0,148F\dot{\varphi}_2 &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$t_1 = \sqrt{\frac{76,285}{1,2}} t \left[\frac{\kappa\Gamma\text{М}}{\kappa\Gamma\text{М}\cdot\text{сек}^2} \text{сек} \right]; \quad F = \frac{K_1}{76,285}.$$

Составим характеристическое уравнение системы [4]

$$11,08P^4 + (1,814F - 2,93)P^2 + 0,154 + 0,0014F = 0.$$

Можно показать, что в этом случае условия устойчивости имеют вид

$$\begin{aligned}1,814F - 2,93 &> 0; \\ 0,154 + 0,0014F &> 0; \\ (0,814F - 2,93)^2 - 44,32(0,154 + 0,0014F) &> 0.\end{aligned}$$

Совместно решить данные неравенства можно при $F > 3,1$. В результате получаем чисто мнимые корни характеристического уравнения, что не позволяет судить о поведении системы на границе колебательной устойчивости [2].

В целях определения характерных нелинейностей опорно-двигательной системы человека при стоянии были проанализированы ее импульсные характеристики, полученные экспериментально. Характеристики снимались на установке, регистрирующей входное воздействие (толчок) и реакцию системы — перемещение проекции центра тяжести в горизонтальной плоскости.

Неоднозначность регистрируемых реакций при одинаковых толчках свидетельствует о нелинейности системы. Анализ полученных экспериментальных данных свидетельствует о наличии нелинейности типа «зона нечувствительности», которая проявляется при углах наклона корпуса до $30-45'$. Эта нелинейность определяется, очевидно, пороговыми характеристиками афферентных систем и является причиной появления в системе устойчивого предельного цикла, который выражается в колебаниях общего центра тяжести в горизонтальной плоскости, а при ухудшении условий равновесия приводит к возникновению автоколебаний большей амплитуды.

Экспериментальные данные показывают, что в некоторых случаях период (время) реакции зависит от величины возмущающего воздействия, причем возрастание амплитуды вызывает уменьшение периода, что подтверждает наличие в системе нелинейности типа «жесткой» характеристики.

Рассмотренные нелинейности обеспечивают высокое качество системы регулирования, так как при большом отклонении система быстро возвращается в равновесное состояние, а на незначительное реагирует вяло или вообще не реагирует.

Все виды нелинейностей, в том числе и не рассматривающиеся в данной работе, можно использовать как нелинейные корректирующие элементы для улучшения процессов управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полян М. П., Морейнис И. П. Исследование элементов движений звеньев тела во фронтальной плоскости при ходьбе. Сб. «Протезирование и протезостроение», вып. 26. М., ЦНИИПП, 1971, с. 22—31.
2. Попов Е. П. Динамика систем автоматического регулирования. М., Гостехиздат, 1954. 795 с.
3. Внуков В. А., Гуревич Р. А. К вопросу о физической модели системы поддержания равновесия человека. Сб. «Проблемы бионики», вып. 10. Изд-во Харьковск. ун-та, 1973, с. 33—37.

БИОМЕХАНИКА АККОМОДАЦИОННОГО АППАРАТА ГЛАЗА ЧЕЛОВЕКА

В. Ф. Ананин

Принято считать (Гельмгольц, 1856, Гульшtrand, 1909) [1, 2], что изображение на сетчатке разноудаленных от глаза предметов обусловлено изменением только одного компонента оптической системы глаза — хрусталика. При этом, по Гельмгольцу, изменяется лишь кривизна наружных поверхностей хрусталика, а по Гульшtrandу, кроме того, изменяется также показатель преломления хрусталика и радиусы ядра — центральной зоны хрусталика. К настоящему времени экспериментально доказано лишь изменение наружной формы хрусталика, т. е. подтверждены первичные результаты наблюдений Гельмгольца (Дашевский, 1962) [3].

Если принять за основу точку зрения Гельмгольца и Гульшtrandа на механизм настройки оптического аппарата глаза человека в процессе аккомодации, то логично допустить, что глаз человека, лишенный хрусталика, не должен аккомодировать. Однако экспериментальные данные не позволяют согласиться с этим утверждением. Под этими данными подразумевается прежде всего большой клинический материал относительно частичной способности афактических глаз к аккомодации, у которых хрусталик отсутствует. Кроме того, сюда включается объективно показанная [4] возможность аккомодации у лиц с интраокулярной коррекцией, т. е. с искусственно вставленным хрусталиком. Последние, как показали измерения, способны аккомодировать в среднем на величину до 3 Д. Экспериментальные результаты подтверждают справедливость ранее выдвинутой гипотезы [5] для механизма аккомодации, в частности, для механизма настройки оптического аппарата глаза человека. В соответствии с предложенной гипотезой оптический аппарат глаза человека настраивается на разноудаленные предметы в результате одновременного изменения кривизны наружных поверхностей хрусталика и продольного смещения сетчатки вследствие деформации глазного яблока. При этом величина смещения сетчатки как приемной плоскости изображений в зависимости от расстояния до предмета теоретически определялась на основании методов оптики и получалась в виде гиперболической функции [6] (рис. 1), а эксперименты, проведенные на артефактах, подтвердили справедливость теоретических расчетов.

Эти результаты обусловили постановку вопроса о динамике распределения сил на глазном яблоке непосредственно при аккомодации. При этом необходимо было прежде всего определить действие тех сил, которые в процессе аккомодации приводят к смещению сетчатки, т. е. к деформации глазного яблока.

Биомеханику аккомодационного аппарата глаза, т. е. динамику распределения сил на глазном яблоке при аккомодации, можно представить в виде действия нескольких сил, которые в общем виде делятся на внешние и внутренние. Под внешними подразумеваются усилия, создаваемые воздействием наружных мышц на глазное яблоко и натяжением зрительного нерва на задний полюс глазного яблока. Внутренние силы связаны с действием аккомодационной мышцы и цилиарного мускула на хрусталик и стекловидное тело.

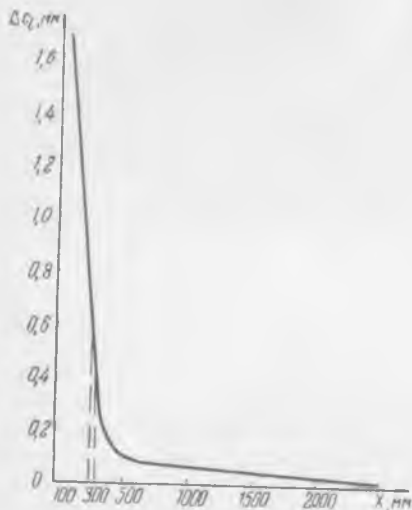


Рис. 1. Удлинение передне-задней оси глазного яблока при аккомодации.

Остановимся на характеристике каждого вида этих сил.

Известно, что глазное яблоко, помимо специальных связей, поддерживается в черепной глазной впадине шестью глазными мышцами.

В соответствии с правилами механики усилия со стороны мышц на глазное яблоко можно представить в виде векторов сил. Рассмотрим только действие горизонтальных мышц, так как вертикальные мышцы воздействуют аналогично.

Предположим, что оптические оси обоих глаз параллельны, т. е. глаза смотрят вдаль. В этом случае распределение сил можно представить в виде схемы векторов сил (рис. 2, а) и записать равенство

$$\bar{F}_n = \bar{F}_в,$$

где \bar{F}_n — сила натяжения, создаваемая наружной мышцей, а $\bar{F}_в$ — внутренней. Равнодействующая \bar{F} этих сил будет направлена вдоль передне-задней оси глаза. Мышцы в соответствии с анатомическими данными на определенном участке от места крепления к глазному яблоку накладываются на его поверхность, оказывая на него некоторое давление. Разложим векторы сил \bar{F}_n и $\bar{F}_в$ на составляющие, одна из которых направлена по касательной к поверхности глазного яблока в точках M и N крепления мышцы, т. е. $\bar{F}_{n,к}$ и $\bar{F}_{в,к}$, а другая — \bar{F}_{n2} и $\bar{F}_{в2}$ — в сторону глазного яблока.

При такой схеме распределения сил глазное яблоко испытывает определенное воздействие со стороны мышц. В этом случае

$$\bar{F}_n = \bar{F}_в;$$

$$\bar{F}_{H2} = \bar{F}_{B2};$$

$$\bar{F}_{H, K} = \bar{F}_{B, K}.$$

При конвергенции глазное яблоко поворачивается относительно своего центра O_2 на угол α_2 (рис. 2, б). Рассмотрим положение правого глаза.

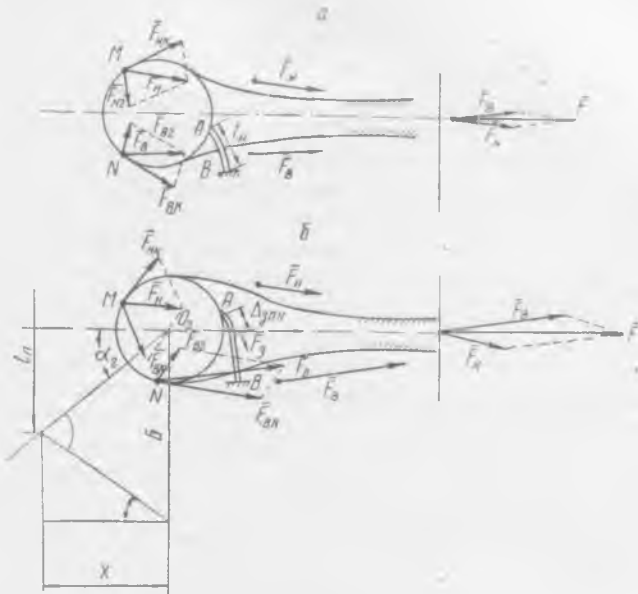


Рис. 2. Распределение внешних сил:
а — при покое аккомодации; б — при конвергенции.

Аргюги принимаем, что зависимость между силой, развиваемой мышцей, и углом поворота глаза прямо пропорциональна. Тогда для правого глаза

$$F_B = k \operatorname{tg} \alpha_2 = k \frac{l_n + B}{2X}, \quad (1)$$

где k — коэффициент пропорциональности;
 l_n — размер рассматриваемого предмета;
 B — база глаз;
 X — расстояние от глаз до предмета.

При этом считаем, что $\bar{F}_{H, K} = \bar{F}_H$. В данном случае схема распределения сил имеет вид, представленный на рис. 2, б. Таким образом, с увеличением угла конвергенции действие со стороны мышц глаза на глазное яблоко возрастает обратно пропорционально расстоянию.

К внешним силам можно отнести также натяжение заднего полюса глазного яблока со стороны зрительного нерва. При

конвергенции зрительный нерв, закрепленный своими концами в местах A и B (рис. 2), будет натягиваться. При этом удлинение зрительного нерва в зависимости от угла конвергенции определится по формуле

$$\Delta_{\text{нр. н}} = \frac{l_{\text{н}}}{\cos \arctg \frac{D}{l_{\text{н}}} \sin \frac{\alpha_2}{2}}, \quad (2)$$

где $l_{\text{н}}$ — длина зрительного нерва;

α_2 — угол конвергенции.

Удлинение зрительного нерва приводит к натяжению склеры со стороны заднего полюса глазного яблока, преимущественно с височной стороны. Действие натяжения со стороны зрительного нерва можно представить в виде вектора силы \vec{F}_3 , направленного вдоль зрительного нерва. Направление вектора силы позволяет утверждать, что ее действие также должно вызывать растяжение склеральной оболочки глаза, прежде всего с височной стороны.

Внутренние силы

Чтобы наглядно представить действие внутренних сил на глазное яблоко, обратимся к схеме, которая составлена с учетом анатомических данных о воздействии аккомодационной мышцы на хрусталик (рис. 3, a). При сокращении аккомодационной мышцы, как известно, участки цилиарного мускула, соприкасающиеся непосредственно с циновыми связками хрусталика, перемещаются в направлении к передне-задней оси глазного яблока (рис. 3, b). Перемещение на величину Δr происходит по определенному участку цилиарного мускула, в результате чего соответствующий объем стекловидного тела, вытесненный данным участком цилиарного мускула, должен переместиться в другое положение. Величину этого объема можно определить по формуле

$$\Delta V = 2\pi Lr\Delta r, \quad (3)$$

где L — отрезок, на котором, сокращается аккомодационная мышца;

r — внутренний радиус цилиарного мускула.

В данном случае ΔV следует рассматривать как приращение объема в замкнутой системе глазного яблока, вызванное увеличением объема цилиарного мускула вследствие сокращения его аккомодационной мышцы.

Подобную ситуацию можно представить аналогично явлению, когда резиновый шар, заполненный жидкостью до определенного внутреннего давления, создает в его оболочке соответствующий давлению натяг. К внутренней поверхности шара в виде цилиндрического кольцевого пояса жестко, одной стороной крепится манжетка, в которую снаружи можно накачивать воздух. В глазном яблоке роль манжетки выполняет аккомодационная мышца. Если в манжетке отсутствует воздух, то объем внутри шара со-

ответствует объему жидкости вместе с объемом манжетки без воздуха. При увеличении объема манжетки за счет накачки ее воздухом на величину ΔV внутренний объем шара также возрастает на ΔV , и объем жидкости ΔV , вытесненный возросшим объемом манжетки, будет оказывать давление на стенки шара. В результате внутренний диаметр шара увеличится на Δc вследствие деформации его оболочки. При этом Δc должна быть такой, чтобы объем вытесненной жидкости ΔV смог разместиться в возросшем внутреннем объеме шара за счет увеличения его радиуса на Δc .

При наличии замкнутой системы с внутренним давлением, обусловленным в данном случае составными элементами, находящимися внутри глазного яблока, приращение объема ΔV неизбежно должно вызывать либо уменьшение объема содержимого внутри глазного яблока на ту же величину за счет выхода этой части объема за пределы глазного яблока, либо увеличение объема глазного яблока вследствие растяжения его опорной оболочки, т. е. склеры, как это было показано на примере с резиновым шаром, или же уплотнение среды внутри глазного яблока. Наиболее очевидно возрастание объема глазного яблока из-за растяжения его наружной оболочки. При этом возникает вопрос, в каком направлении должно осуществляться преимущественное растяжение оболочки глаза. Согласно законам гидродинамики, давление вследствие вытесненного объема ΔV должно равномерно распределяться по всей поверхности глазного яблока. Но в соответствии с динамикой распределения сил со стороны мышц глаза растяжение глазного яблока в направлениях, перпендикулярных к передне-задней оси глаза, из-за давления со стороны мышц ничтожно или вообще невозможно. Наиболее вероятная возможность — это перемещение стекловидного тела в направлении к передне-задней оси.

Однако движению вытесненного объема стекловидного тела в сторону хрусталика препятствует его задняя поверхность, хотя этот объем оказывает определенное давление на хрусталик. Не исключено, что именно под действием вытесненной массы стекловидного тела хрусталик продольно смещается вдоль оптической оси на $0,3—0,4$ мм (явление, в первые отмеченное Гельмгольцем при аккомодации) и в связи с этим незначительно изменяется кривизна его задней поверхности. Остается одно наиболее веро-



Рис. 3. Распределение внутренних сил:
a — при покое аккомодации;
б — при максимальной аккомодации.

ятное направление перемещения вытесненного объема стекловидного тела, в котором он встречает наименьшее сопротивление, — в сторону заднего полюса глазного яблока. При этом барьером, препятствующим увеличению внутреннего объема глазного яблока на ΔV , в данном случае является только опорная оболочка заднего полушария глазного яблока.

Однако из-за высокой эластичности этой оболочки ее деформация на величину Δ_c , обеспечивающую приращение внутреннего объема глазного яблока на ΔV , неизбежна и вполне логична.

Одновременно деформацией заднего участка склеры на Δ_c на ту же величину смещается и сетчатка.

Характер смещения сетчатки в процессе аккомодации, как было показано, имеет гиперболическую функцию, а его наибольшая величина для максимальной аккомодации (расстояние до предмета 100 мм) составляет 1,4 мм для глаза с задним фокусным расстоянием при покое аккомодации 23 мм.

Действие описанных выше сил на глазное яблоко сильнее всего начинает проявляться при работе глаз на близком расстоянии, начиная с 300 мм и меньше (рис. 1, формула (1)), и при этом их суммарное воздействие в конечном итоге направлено на деформацию глазного яблока.

Наиболее тонким регулятором в данной деформации бесспорно являются внутренние силы, которые можно рассматривать как целесообразный фактор в общем процессе настройки оптического аппарата глаза при аккомодации. Действие внешних сил можно оценивать как следствие чрезмерной перегрузки аккомодационного аппарата, вызванной работой глаз на близких расстояниях, т. е. менее 300 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Helmholtz H. Uber die Akkomodation des Auges. «Arch. f. Ophth.», Н. 1, 2 (1855).
2. Gullstrand A. Die Dioptrik des Auges. В кн.: H. Helmholtz. «Handbuch der physiologischen Optik», Bd. I. Hamburg u. Leipzig, 1909. с. 43—57.
3. Дашевский А. И. Рефракция глаза. В кн.: «Глазное руководство». М., «Медицина», 1962, с. 87—93.
4. Ананин В. Ф. Объективная регистрация аккомодации глаза при интраокулярной коррекции афакии. «Офтальм. ж.», 1972, № 2, с. 92—97.
5. Ананин В. Ф. Модель аккомодационного механизма глаза, объясняющая процесс возникновения близорукости. «Тезисы докл. научной сессии посв. 30-летию ВНИИМП». М., 1968, с. 67—68.
6. Ананин В. Ф., Бегунова П. Б. Некоторые соображения об аккомодационном аппарате глаза человека. Сб. «Новые оптические медицинские приборы». М., ВЗМИ, 1968, с. 11—20.

АВТОМАТИЧЕСКАЯ НОРМАЛИЗАЦИЯ ПРИ КОМБИНИРОВАННЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЯХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

*Е. П. Пуятин, Б. К. Лопатченко,
В. Б. Левиков, О. М. Абрамов*

Разработка операторов нормализации изображений, подвергнутых комбинированным преобразованиям, имеет важное значение при конструировании устройств для распознавания образов, следящих систем и т. д. Алгоритмы и устройства отстройки от ряда аффинных преобразований [1—3] используются при темном фоне. В реальных условиях эксплуатации технических устройств преобразованию часто подвергается не только носитель, но и сама функция яркости, описывающая изображение. В этом случае приведенные алгоритмы не могут применяться. Использование для отстройки алгоритмов, описанных в работе [4], вместе с алгоритмами отстройки от аффинных преобразований значительно усложнит такое устройство и увеличит время нормализации. Поэтому важно располагать алгоритмами параллельной отстройки от всего комплекса преобразований, необходимого для данного устройства.

Примером таких преобразований изображений могут служить произвольные растяжения (сжатия) картин при одновременном изменении уровня яркости.

1. Для изображений, начало координат которых совпадает с оптическим центром тяжести, произвольные изменения уровня яркости и масштабов по осям образуют класс эквивалентности, в котором функции изображений связаны соотношением

$$B(x, y) = kB_0(\lambda x, \mu y), \quad (1)$$
$$k \neq 0; \lambda \neq 0; \mu \neq 0.$$

Задачи, приводящие к таким преобразованиям, возникают в том случае, если на темном фоне в поле зрения устройства нормализации на разных расстояниях предъявляются плоские объекты, причем освещенность в пространстве неравномерна по глубине. Тогда изменения функций изображений связаны соотношением (1) с коэффициентами $\lambda = \mu$. Коэффициенты будут меняться также в процессе поворота плоских объектов вокруг вертикальной либо горизонтальной осей, лежащих в плоскости, перпендикулярной к оптической оси устройства. При этом изменятся коэффициенты λ либо μ для проекции изображения на эту плоскость. Одновременно будет меняться величина k (кроме случая равномерной освещенности в пространстве для поверхностей, подчиняющихся закону Ламберта).

Для получения нормализованных картин перспективные искажения должны быть небольшими. Это достижимо, если линейные

размеры объекта невелики по сравнению с расстоянием между ним и объективом устройства.

Рассмотрим процесс построения оператора нормализации для таких картин. Осуществим последовательную нормализацию для группы диагональных преобразований, а затем — для пропорционального изменения яркости. Воспользуемся оператором нормализации для диагональных преобразований [3]

$$F_1[B(x, y)] = B[\Phi_1(B)x, \Phi_2(B)y], \quad (2)$$

где

$$\Phi_1(B) = \sqrt{\frac{\iint_D B(x, y) x^2 dx dy}{\iint_D B(x, y) dx dy}}; \quad (3)$$

$$\Phi_2(B) = \sqrt{\frac{\iint_D B(x, y) y^2 dx dy}{\iint_D B(x, y) dx dy}}.$$

Чтобы нормализовать изменения коэффициента яркости, воспользуемся нормализатором F_2 :

$$F_2[B(x, y)] = \frac{B(x, y)}{\sqrt[m]{\iint_D [B(x, y)]^m K(x, y) dx dy}}. \quad (4)$$

Как следует из работы [3], с целью нормализации преобразований вида (1) путем применения суперпозиции операторов $F_2 F_1$ необходимо выполнить условие

$$F_1[k \cdot B] = k \cdot F_1(B). \quad (5)$$

С учетом $\Phi_1(kB) = \Phi_1(B)$ и $\Phi_2(kB) = \Phi_2(B)$ левая часть уравнения (5) запишется в виде

$$F_1[kB] = kB[\Phi_1(B)x, \Phi_2(B)y],$$

т. е. равенство (5) действительно имеет место. Нормализованное (эталонное) изображение выразится через исходное соотношением

$$B_0(x, y) = F_2 F_1[B(x, y)] = \frac{B[\Phi_1(B)x, \Phi_2(B)y]}{\Phi_3(B)}, \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} \Phi_3(B) &= \sqrt[m]{\iint_D \{B[\Phi_1(B)x, \Phi_2(B)y]\}^m K(x, y) dx dy} = \\ &= \sqrt[m]{\iint_D [B(u, v)]^m K \left[\frac{u}{\Phi_1(B)}, \frac{v}{\Phi_2(B)} \right] \frac{dudv}{\Phi_1(B)\Phi_2(B)}}. \end{aligned} \quad (7)$$

В частности, при $K(x, y) \equiv 1$ и $m = 1$

$$\Phi_3(B) = \frac{\left[\iint_D B(x, y) dx dy \right]^2}{\sqrt{\iint_D B(x, y) x^2 dx dy \cdot \iint_D B(x, y) y^2 dx dy}}. \quad (8)$$

2. Для автоматической нормализации изображений при пропорциональных изменениях яркости и произвольных смещениях условие преобразований запишется следующим образом:

$$B(x, y) = kB_0(x - l, y - m). \quad (9)$$

Этот случай имеет важное значение для проектирования следящих систем. Измерительное устройство, в основе которого лежит подобный алгоритм, позволяет следить за полутоновыми объектами, произвольно расположенными в поле зрения при различных условиях освещенности.

Построим оператор нормализации. Для этого последовательно нормализацию проведем сначала для группы смещений, используя оператор [3]:

$$F_1[B(x, y)] = B[x + \Phi_1(B), y + \Phi_2(B)], \quad (10)$$

где

$$\Phi_1(B) = \frac{\iint_D B(x, y) x dx dy}{\iint_D B(x, y) dx dy}; \quad \Phi_2(B) = \frac{\iint_D B(x, y) y dx dy}{\iint_D B(x, y) dx dy},$$

а затем — для пропорционального изменения яркости с использованием оператора $F_2[B(x, y)]$ в форме (4).

Здесь, как и в предыдущем случае, выполняется необходимое условие нормализации $F_1(kB) = kF_1(B)$. Переходя от последовательной нормализации к параллельной, получаем общий оператор нормализации

$$B_0(x, y) = F_2 F_1[B(x, y)] = \frac{B[x + \Phi_1(B), y + \Phi_2(B)]}{\Phi_3(B)}, \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned} \Phi_3(B) &= \sqrt[m]{\iint_D \{B[x + \Phi_1(B), y + \Phi_2(B)]\}^m K(x, y) dx dy} = \\ &= \sqrt[m]{\iint_D [B(u, v)]^m K[u - \Phi_1(B), v - \Phi_2(B)] dudv}. \end{aligned} \quad (12)$$

В простейшем случае при $m = 1$ и $K(x, y) \equiv 1$

$$\Phi_3(B) = \iint_D B(x, y) dx dy. \quad (13)$$

3. Для преобразования подобия

$$B(x, y) = kB_0(\lambda x, \lambda y) + C \quad (14)$$

вначале используем оператор нормализации яркостных преобразований, предложенный в работе [4]:

$$F[B(x, y)] = \frac{B(x, y) - \Phi_1(B)}{\Phi_2(B) - \Phi_2(B)}, \quad (15)$$

где функционалы $\Phi_2^{\cdot}(B)$ и $\Phi_2^{\prime\prime}(B)$ удовлетворяют условию

$$\begin{aligned}\Phi_2^{\cdot}(B) &= k\Phi_2^{\cdot}(B_0) - c; \\ \Phi_2^{\prime\prime}(B) &= k\Phi_2^{\prime\prime}(B_0) - c.\end{aligned}\quad (16)$$

Затем воспользуемся оператором нормализации подобия. В качестве нормализатора подобия применяем оператор

$$F_2[B(x, y)] = B\{\Phi_3[B(x, y)]x, \Phi_3[B(x, y)]y\}, \quad (17)$$

где

$$\begin{aligned}\Phi_3[B(x, y)] &= \frac{\sqrt[2]{\int\int_D B(x, y) x^{m_1} y^{n_1} dx dy}}{\sqrt[2]{\int\int_D B(x, y) x^{m_2} y^{n_2} dx dy}}; \quad \frac{m_1 + n_1 + 2}{P_1} - \\ &\quad - \frac{m_2 + n_2 + 2}{P_2} = 1.\end{aligned}\quad (18)$$

В простейшем случае при $P_1 = P_2 = 1$, $n_1 = n_2 = m_2 = 0$, $m_1 = 1$

$$\Phi_3[B(x, y)] = \frac{\int\int_D B(x, y) x dx dy}{\int\int_D B(x, y) dx dy}.\quad (19)$$

В результате суперпозиции получаем результирующий оператор вида

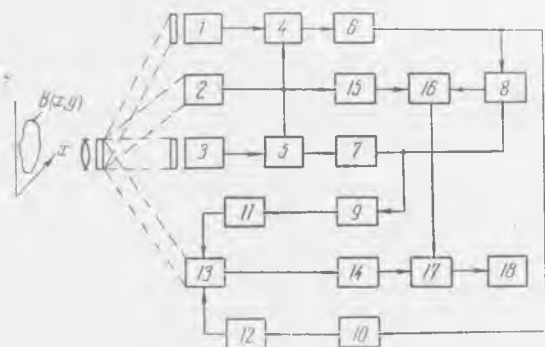
$$F_2 F_1[B(x, y)] = B_0(x, y) = \frac{B\{\Phi_2[F_1(B)]x, \Phi_3[F_1(B)]y\} - \Phi_1[B(x, y)]}{\Phi_2[B(x, y)] - \Phi_2^{\prime\prime}[B(x, y)]}, \quad (20)$$

где

$$\begin{aligned}\Phi_1(B) = \Phi_2^{\cdot}(B) &= \frac{\int\int_D B(x, y) \frac{1}{x^2} dx dy}{\int\int_D \frac{1}{x^2} dx dy}; \\ \Phi_2^{\prime\prime}[B(x, y)] &= \frac{\int\int_D B(x, y) \frac{1}{xy} dx dy}{\int\int_D \frac{1}{xy} dx dy}; \\ \Phi_2[F_1(B)] &= \frac{\int\int_D [B(x, y) - \Phi_1(B)] x dx dy}{\int\int_D [B(x, y) - \Phi_1(B)] dx dy}.\end{aligned}\quad (21)$$

В качестве примера технической реализации алгоритмов нормализации рассмотрим оператор (6) с функционалами (3) и (8).

Блок-схема такого устройства представлена на рисунке. В его состав входят фотоприемники (типа ФЭУ) 1—3, делительные устройства 4 и 5, функциональные блоки извлечения квадратного корня 6 и 7, аналоговое множительное устройство 8, генераторы кадровой и строчной разверток 9 и 10, отклоняющие катушки кадровой (11) и строчной (12) разверток, передающая телевизионная трубка 13, видеоусилитель 14, блок возведения в квадрат 15, делительное устройство 16, множительное устройство 17, видеоконтрольное устройство 18.



Изображение объекта, заданного функцией лучистой яркости $B(x, y)$, попадая в поле зрения объектива, через светоделительное устройство одновременно подается на светочувствительные входы фотоприемников 1—3 и передающей телевизионной трубки 13. При этом на входы фотоприемников 1 и 3 изображение проектируется через пространственные фильтры, оптическая плотность которых изменяется по квадратичному закону соответственно вдоль осей x и y . Если световая характеристика фотоприемника линейна, то сигналы с выходов фотоприемников 1—3 соответственно будут пропорциональны величинам

$$\iint_D B(x, y) x^2 dx dy; \quad \iint_D B(x, y) dx dy; \quad \iint_D B(x, y) y^2 dx dy.$$

Делительные устройства 4 и 5 вычисляют отношения

$$\frac{\iint_D B(x, y) x^2 dx dy}{\iint_D B(x, y) dx dy}; \quad \frac{\iint_D B(x, y) y^2 dx dy}{\iint_D B(x, y) dx dy}$$

Функциональные блоки вычисления квадратного корня 6 и 7 на выходе дают значения функционалов $\Phi_1(B)$ и $\Phi_2(B)$. Множительное устройство 8, блок возведения в квадрат 15, делительное устройство 16 вычисляют $\frac{1}{\Phi_3(B)}$. Определенные таким образом функционалы воздействуют на блоки телевизионной системы. Сигнал, пропорциональный функционалу $\Phi_1(B)$, управляет ампли-

тудой строчной развертки генератора 9, изменяя ширину растра передающей трубки 13. Аналогично функционал $\Phi_2(B)$ меняет высоту растра, воздействуя на генератор кадровой развертки 10. Это обеспечивает нормализацию при растяжении изображения по осям x и y . Окончательную нормализацию по яркости обеспечивает множительное устройство 17, на один вход которого подается видеосигнал с передающей трубки 13 через видеоусилитель 14, а на другой — напряжение, пропорциональное величине $\frac{1}{\Phi_2(B)}$. Нормализованный сигнал обеспечивает на видеоконтрольном устройстве 18 эталонное изображение, инвариантное изменениям размера и яркости входного изображения, которые описываются формулой (1). В принципе могут быть разработаны устройства нормализации, реализующие иные алгоритмы, предложенные в данной работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Путятин Е. П., Шульгин И. В., Юрченко В. П., Абрамов О. М. К вопросу о моделировании механизмов нормализации зрительных образов. Сб. «Проблемы бионики», вып. 5. Изд-во Харьковск. ун-та, 1971, с. 102—106.
2. Путятин Е. П., Шульгин И. В., Юрченко В. П. Построение инвариантов смещения и поворота зрительных картин. Сб. «Биологическая, медицинская кибернетика и бионика», вып. 3. Ин-т кибернетики АН УССР, Киев, 1970, с. 51—64.
3. Путятин Е. П., Левиков В. Б., Юрченко В. П., Абрамов О. М., Берман В. А. О нормализации изображений при аффинных преобразованиях. Сб. «Проблемы бионики», вып. 8. Изд-во Харьковск. ун-та, 1972, с. 44—52.
4. Путятин Е. П., Лопатченко Б. К., Левиков В. Б., Сердюченко В. Я. Нормализация изображений при изменении яркости и контрастности (статья в настоящем сборнике), с. 5—13.

ТЕОРЕТИКО-ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ МЕХАНИЗМА ЛОГИЧЕСКИХ КООРДИНАТ

С. И. Шапиро

Процесс свертывания мыслительных структур у человека при усвоении понятий с помощью алгоритмов завершается образованием неполных операторно-логических форм — логических координат [1, 2], например: для понятия высоты треугольника — «перпендикуляр к стороне», медианы — «делит сторону пополам», биссектрисы — «делит угол пополам» и т. д. Они имеют эвристическую природу, служат для «первого наведения» и играют важную роль в феномене инсайта, когда для решения задачи неизвестны регуляторные методы.

Для оценки эффективности механизма логических координат в математическом мышлении посредством теоретико-информационных методов воспользуемся теоремой Шеннона.

Теорема. При кодировании множества сигналов с энтропией H в алфавите из m символов в случае отсутствия шумов средняя длина кодового слова не меньше $\frac{H}{\log m}$.

Если вероятности сигналов не выражены целочисленными отрицательными степенями m , то указанная нижняя грань недостижима. Однако при кодировании к ней можно сколь угодно приблизиться достаточно длинными блоками.

Если длина кодового слова стремится к L_{\min} , то скорость переработки информации приближается к своему наибольшему значению — пропускной способности системы.

Экспериментально определенное (в опыте участвовало 300 испытуемых) обобщение «Основные линии в треугольнике» характеризуется набором понятий — компонентов с известным распределением вероятностей. Если при прочих равных условиях в задаче идет речь об отрезке в треугольнике, то с вероятностью 0,43 актуализируется понятие высоты, с вероятностью 0,19 — понятие медианы; 0,11 — биссектрисы; 0,11 — средней линии; 0,06 — стороны; 0,06 — катета или гипотенузы; 0,04 — другие случаи.

Допустим, что мыслительный акт отражается выбором из перечисленного репертуара альтернатив. Тогда среднее количество переработанной человеком информации $H = -(0,43 \log 0,43 + 0,19 \log 0,19 + \dots + 0,04 \log 0,04) = 1,9$ бит [3]. Это число, по-видимому, характеризует готовность человека к решению определенного типа задач еще до их постановки, к предвосхищению результата при неполной информации об объекте. Однако эксперимент показывает, что в реальной ситуации решения задач испытуемый, как правило, выбирает не из всех возможных исходов, а только из нескольких, наиболее вероятных, отбрасывая остальные. В данном случае подразумеваются высота, медиана, биссектриса, средняя линия. В связи с этим происходит перераспределение вероятностей. Для их нахождения воспользуемся известной в математической психологии аксиомой выбора Люса [5].

Аксиома. Отношение вероятностей фиксированных альтернатив есть величина постоянная, не зависящая от множества альтернатив, в состав которого входят данные.

Стается разделить 1 в отношении 0,43; 0,19; 0,11; 0,11. Вероятности высоты, медианы, биссектрисы, средней линии выразятся соответственно 0,51; 0,23; 0,13; 0,13.

Каждое понятие, если считать его независимым, в условиях решения задач является сигналом, а процесс многократного обращения к обобщению — последовательностью сигналов. Тогда оптимальная средняя скорость переработки информации в алфавите «да — нет (1,0)» достигается соответствующим кодированием.

Воспользуемся известной схемой Шеннона — Фэно. Множество кодируемых сигналов разбивается на две группы таким образом, чтобы суммарные вероятности по возможности были ближе друг к другу. Одной группе приписывается символ 0, другой — 1. Это

первые кодовые знаки сигнала. Затем процедура повторяется для каждой группы, аналогично получаются вторые кодовые знаки. Так продолжается до тех пор, пока в каждой подгруппе не окажется по одному сигналу (таблица).

Сигнал (компонента обобщения)	Вероятность сигнала	Кодовый знак			Код сигнала
		первый	второй	третий	
Высота	0,51	1	—	—	1
Медиана	0,23	0	1	—	01
Биссектриса	0,13	0	0	1	001
Средняя линия	0,13	0	0	0	000

Доказывается, что выравнивание вероятностей приводит к уменьшению избыточности и соответственно к максимальному возрастанию информационной нагрузки на каждый символ.

Особенность процедуры заключается в том, что одни коды не являются начальными отрезками других, в противном случае декодирование было бы невозможно. Так, если бы код медианы записывался 11, то это могло быть расшифровано как двукратное повторение высоты — один и один:

$$H = -(0,51 \log 0,51 + 0,23 \log 0,23 + 2 \cdot 0,13 \log 0,13) = 1,748 \text{ бит};$$

$$\log m = \log 2 = 1.$$

По теореме Шеннона, $\frac{H}{\log m} = 1,748$. Это минимально возможная длина кодового слова, обеспечивающая наибольшую проводимость информации. Среднее количество символов на один сигнал составляет $0,51 \cdot 1 + 0,23 \cdot 2 + 2 \cdot 0,13 \cdot 3 = 1,750$.

Кодирование, как видим, близко к оптимальному, хотя и содержит некоторую избыточность: $1,750 - 1,748 = 0,002$ (этого следовало ожидать, так как вероятности близки к целым степеням $m: \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \frac{1}{8}$).

Обозначим $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ — операторы идентификации объекта с высотой, медианой, биссектрисой, средней линией; B, M, B, C — операторы: заключения о принадлежности объекта соответствующему понятию; a, b, c — логические условия, определяемые следующим образом:

$$a, b, c = \begin{cases} 1, & \text{если отрезок — высота (медиана, биссектриса)} \\ 0 & \text{— в противном случае.} \end{cases}$$

Тогда оптимальным является процесс реализации обобщения, описанный алгоритмом Ляпунова:

$$\alpha a \uparrow B. \downarrow \beta b \uparrow M. \downarrow \gamma c \uparrow B. \downarrow C.$$

Алгоритм [составлен на основании экспериментальных данных, полученных при решении задач школьниками. (Напомним, что если логическое условие равно единице, то, не обращая внимания на последующую стрелку, переходят к стоящему справа оператору. В противном случае обращаются к оператору, перед которым опускается стрелка с таким же номером). При распознавании высоты срабатывает один оператор (α), медианы — два оператора (α, β), биссектрисы и средней линии — три (α, β, γ). Это согласуется с результатами кодирования (таблица). Механизм поиска человеком решения задачи в первом приближении описывается теоремой Шеннона.

Однако алгоритмическая форма относится лишь к начальному периоду усвоения понятий. В дальнейшем очередность в переборе компонентов сменяется их одновременной актуализацией [6]. Сформированное обобщение — не высота, медиана или биссектриса, а и то, и другое, и третье вместе. Это «и» дает приращение, отражаемое переходом к логической форме abc . Речь, по-видимому, идет о тех «достаточно длинных блоках», которые, в соответствии с теоремой Шеннона, повышают скорость переработки информации.

Таким образом, психологический процесс свертывания операторного компонента образования уплотненных символов, посредством которого осуществляется переход к логической форме, можно объяснить как механизм уменьшения избыточности, приближения к оптимальному информационному режиму.

Однако в реальном мышлении алфавит образуется не из абстрактных символов, как это имеет место в технических системах связи, а из конкретных признаков понятий. Важно, что в качестве кодовых знаков вычленяются логические координаты — признаки, наиболее характерные для данного понятия и отличающие его от других элементов обобщения. Например, для высоты — «перпендикуляр к стороне» (1 — «да», 0 — «нет»); для медианы — «делит сторону пополам» (01 означает «не перпендикуляр к стороне, делит ее пополам») и т. д. Следовательно, кодирование связано с эффективным различением.

Однако логические координаты не детерминируют однозначно развертку понятия. «Перпендикуляр к стороне» принадлежит не только высоте треугольника, а, скажем, радиусу вписанного круга и даже высоте, медиане и биссектрисе одновременно. Возникает опасность наложений. Так, логическая координата медианы является началом логической координаты средней линии: отрезок делит одну и другую стороны пополам.

Наложениями, по-видимому, объясняются некоторые ошибки в рассуждениях учащихся, например утверждение: «Центр окружности, описанной около треугольника, находится на пересечении высот». Оказывается, здесь «перпендикуляр к стороне», т. е. логическая координата высоты неправомерно развертывается в высоту.

Понятия, вошедшие в состав более сложного единства, как бы отказываются от доли своей определенности ради уменьшения

информационных потерь в среднем на один сигнал обобщения. Это плата ранее независимых компонентов за объединение, вхождение в систему. Однако потери определенности отдельными составляющими, как правило, компенсируются повышенной упорядоченностью целого.

Полученные результаты объясняют некоторые психологические особенности инсайта при решении задач человеком.

Известно, что свертыванию в первую очередь подвергаются наиболее часто повторяющиеся сигналы. Они, следовательно, имеют самые короткие коды.

Если считать все логические координаты равнотрудными для распознавания (это, по-видимому, имеет место, когда они элементарны), то на каждое осмысливание многократно повторяющегося понятия потребуется сравнительно меньше времени, чем на другие понятия (обозревается меньшее число признаков). С другой стороны, к этому понятию обращаются чаще, чем к другому. Дело в том, что эффективное кодирование приближает произведение частоты сигнала на длину кодового слова к постоянной величине для всех составляющих обобщения. Соответственно к постоянному приближается и суммарное время, затрачиваемое на осмысливание любого из понятий. Практически это означает, что в данный момент с примерно равной вероятностью может «сработать» каждое понятие.

Пример. Пусть на проверку логической координаты требуется t сек. Тогда на одно распознавание высоты, медианы, биссектрисы, средней линии, согласно кодам (таблица), необходимо соответственно t , $2t$, $3t$, $3t$ сек. Вероятности этих понятий относятся как $51 : 23 : 13 : 13$. Отношение произведений — $51 : 46 : 39 : 39$. Речь идет о суммарном времени на распознавание данных понятий. Оно ближе к постоянному по сравнению с исходным ($1 : 2 : 3 : 3$). Следовательно, вероятности актуализации понятий сближаются.

В таком подходе, на первый взгляд, кроется психологическая ловушка: теперь тот факт, что мысль об отрезке в треугольнике вызывает, скажем, мысль о высоте, а не о медиане, в большой степени субъективно переживается как ничем не обоснованная догадка [7]. Сознательное прогнозирование в этих условиях невозможно.

Однако здесь описана только одна (можно сказать, техническая) сторона процесса кодирования. Оказывается, логические координаты обладают способностью восстанавливать полную операторно-логическую форму.

Рассмотрим для примера высоту. После актуализации логической координаты может оказаться:

1. Объект удовлетворяет признаку. В этом случае начинается развертка, восстановление понятия. Создается дополнительный признак, допустим, прохождение отрезка через вершину треугольника. Это приводит к удлинению кодового слова. Вероятность высоты в последовательности сигналов возрастает.

Равновесность обобщения нарушается вследствие возникшей неравномерности исходов, приводящей к накоплению информации на одном полюсе и к временному подавлению других возможных направлений. Это, в свою очередь, является стимулом для дальнейшего развертывания. Развивается цепной процесс, завершающийся полным восстановлением понятия. Информация рождает информацию. Таким образом, «прорыв» к инсайту, отраженный в сознании как бы одномоментным актом, в действительности есть лишь вершина сложного психологического поиска.

2. Объект не удовлетворяет логической координате. В данном случае понятие вновь свертывается (не развертывается), вероятности, насколько это возможно, выравниваются, и управление передается логической координате другого понятия, пока не наступит ситуация, описанная в п. 1.

На подступах к инсайту из-за временно возникающей неравновероятности исходов создается избыточность, ухудшающая средний режим переработки информации. В результате можно ожидать определенной замедленности в решении задач на некотором интервале «перед скачком». Феномен приторможенности действительно наблюдается в реальном процессе решения задач человеком.

... Учащийся сосредоточенно думает, но никаких новых действий не производит; несколько раз повторяются рассуждения, но выраженного продвижения в решении нет. Состояние — беспокойное, как бы тревожного ожидания. Отдельные реплики: «Чувствую, решение где-то здесь... Должно получиться» и т. д.

Наблюдения и специальные эксперименты показывают, что такое состояние часто предшествует быстрому решению задачи. Время, в течение которого оно развивается, станем называть окрестностью инсайта. В соответствии с теоретико-информационным анализом окрестность инсайта характеризуется замедленным (и неполным) воспроизведением известных человеку алгоритмов, опусканием большой посылки в умозаключениях [8] и даже кажущимся ухудшением ранее выработанных навыков. Об этом, в частности, свидетельствует экспериментальная проверка с помощью специальной методики скорости и безошибочности вычислений школьниками на логарифмической линейке [6] в момент, когда намечаются первые признаки решения сложной задачи. Оказывается, скорость вычисления чаще всего значительно меньше пропускной способности соответствующих «информационных каналов», и этим, по-видимому, обеспечивается стабильность и надежность работы. Достаточно принудительно заставить учащихся считать на уровне их обычной пропускной способности, чтобы в вычислениях появились ошибки.

Есть основания предполагать, что известное выпадение из сознания логико-психологического процесса, завершающегося получением результата, также обусловлено избранием преимущественного направления, уменьшением средней скорости переработки информации в окрестности инсайта для достижения всплеска скорости в момент его наступления.

Таким образом, избыточность, неравновероятность, вычленение ведущих понятий с помощью механизма логических координат являются важным звеном человеческого мышления, когда требуется не только провести информацию, сохранить ее, но и активно переработать, найти решение задачи, для которой неизвестен алгоритм.

В отличие от технических систем связи, где путем кодирования достигается близкая к пропускной способности скорость информационного потока, процессы свертывания — развертывания в человеческом мышлении имеют несколько иную направленность. Они служат, в частности, для создания решающего перевеса психических усилий в направлении наиболее вероятного «прорыва», т. е. тех логических координат, которые могут открыть путь к решению задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шапиро С. И. Алгоритмы и обобщенное математическое мышление. Материалы VII межвузовской научной конференции по проблемам умственного развития и его диагностике. Горький, 1971, с. 57—59.

2. Шапиро С. И. Об одном подходе к вопросу о взаимодействии мышления и памяти в математическом рассуждении. Сб. «Психологические механизмы памяти и ее закономерности в процессе обучения», Харьков, 1970, с. 258—262.

3. Яглом А. М., Яглом И. М. Вероятность и информация. М., Физматгиз, 1960. 315 с.

4. Аткинсон Р., Бауэр Г., Кротерс Э. Введение в математическую теорию обучения. М. «Мир», 1969, стр. 184. 486 с.

5. Заварыкин В. М., Печенев М. Т., Шапиро С. И., Шапиро А. И. Применение теории информации к научной организации труда на конвейере. Сб. «Вычислительная техника в машиностроении». АН БССР, Ин-т технической кибернетики, Минск, 1968, с. 143—150.

6. Шапиро С. И. Свернутость умозаключений как парциальное проявление силы нервной системы». «Вопросы психологии», 1968, № 2, с. 91—99.

7. Шапиро С. И. К вопросу о связи между логикой и интуицией в математическом мышлении. «Уч. зап. Курск. пед. ин-та. Вопросы преподавания математики в средней школе и вузе», т. 85, вып. 4. Курск, 1970, с. 128—137.

8. От алгоритмов — к суждениям. (Эксперименты по обучению элементов математического мышления). М., «Советское радио», 1973, 288 с.

ИЗУЧЕНИЕ ОЦЕНОК СХОДСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИЕМАМИ СИНТЕЗА ЭКОНОМНЫХ ОПИСАНИЙ

Е. И. Кабанова, В. А. Махонин

Функции качества, определяемые экспертными оценками

Выявление факторов, влияющих на качество произвольных объектов, с помощью экспертных оценок — весьма трудоемкая задача. Между тем существуют классы объектов, допускающие ее упрощение. Это объекты, качество которых описывается убывающей функцией всех их аргументов, индицирующих силу

проявления отдельных свойств. Такие совокупности свойств образуют измеримые комплексы, обнаруженные у многих объектов диагностических задач прикладной кибернетики. Совокупность изображений тоже образует класс, в пределах которого можно выявить измеримые комплексы свойств.

В наших исследованиях изучались наборы изображений, для которых предполагалось существование измеримого комплекса свойств по отношению к численным оценкам силы их сходства с эталонами. Экспертные оценки подтвердили это предположение. Экспертам предъявлялись изображения из наборов неполных штриховых контурных изображений. Каждый набор получали путем стирания в случайном порядке отдельных штрихов контурного изображения, служившего эталоном по отношению к изображениям из набора. Никаких посторонних штрихов или точек на неполные изображения не наносилось. Эксперты оценивали сходство неполного изображения с эталоном того набора, из которого оно было взято.

Частные совокупности свойств, входящих в измеримый комплекс, образуют измеримые комплексы. Эта особенность измеримых комплексов позволяет группировать свойства в отдельные совокупности и строить функции, связанные с неубывающими зависимостями и со свойствами из этих совокупностей, для того чтобы из этих функций как из промежуточных переменных восстановить функцию, описывающую экспертные оценки. Такое построение промежуточных функций хорошо согласуется с теорией А. Н. Колмогорова о представлении непрерывных функций многих переменных суперпозицией функций одного переменного. По этой теореме [1]

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_i \psi_i(\sum w_{ij}(x_j)), \quad 0 < x_j < 1; \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

Суммы $\sum w_{ij}(x_j)$ играют роль промежуточных переменных. $w_{ij}(x_j)$ непрерывны и увеличиваются с ростом x_j . Функции ψ определяются видом $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, причем известно, что для представления функции n -переменных требуется не более чем $2n + 1$ таких функций. Когда x_j образуют измеримый комплекс свойств, то на ψ_i и w_{ij} можно наложить дополнительные условия: все $w_{ij}(0)$ и w_{ij} равны нулю, а все $\psi_i(z)$ — неубывающие функции z . Эти ограничения полезны при опытным задании функций f , когда функция качества задается в конечном числе точек так называемой обучающей выборки, а затем проверяется на других точках, также известных из опытов и называемых экзаменационной выборкой. Эти дополнительные условия значительно упрощают процедуру восстановления функции качества, описывающей экспертные оценки при соответствующей организации экспертизы.

Экспертиза и вычислительная процедура, построенные с учетом этих условий и предназначенные для восстановления функции

сходства контурных изображений, могут быть полезными при исследованиях функций качества, определяемых экспертными оценками, на ином материале.

Экспертиза сходства

Сходство неполных контурных изображений с их эталонами оценивалось испытуемыми в баллах. Неполные изображения получались из эталонов с помощью случайных стирающих помех,

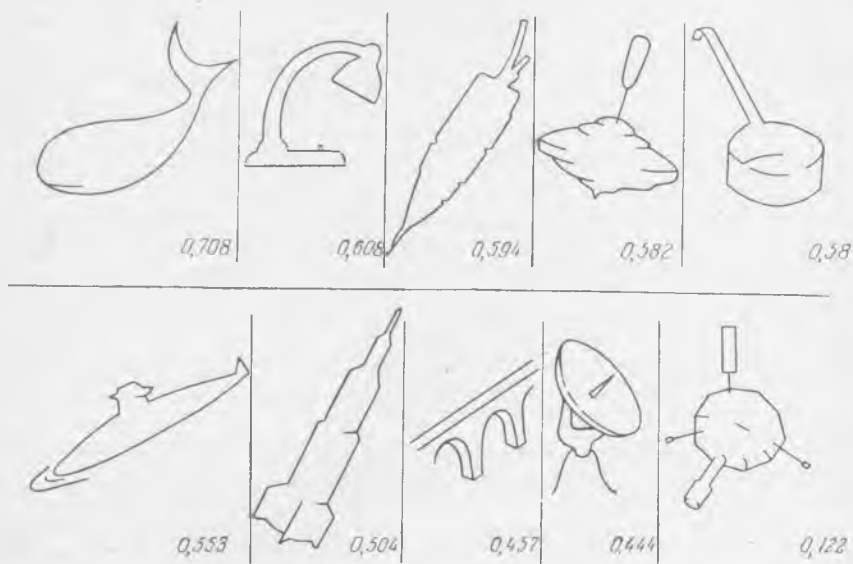


Рис. 1. Кадр из диафильма, использованного в экспертизе.

для чего эталоны подразделялись на 50 штрихов, а номера стираемых и оставляемых штрихов определялись по таблице случайных чисел. Использовалось 11 эталонов. Из каждого эталона сначала готовилось 200 неполных изображений, но позже в диафильмы, предназначенные для массовых экспертиз, включалось по 70 изображений, приготовленных из каждого эталона. Оставлялись изображения, близкие к порогу узнавания, т. е. с оценками сходства в 3—6 баллов. Диафильмы проецировались на экран в большом зале. На каждом кадре был показан эталон, давалось его неполное изображение, условное буквенное обозначение, цифры и изображения шкалы.

Испытуемые записывали в протоколы буквенные обозначения неполных картинок, оценки их сходства с эталонами и некоторые другие сведения (место в зале, замечания по ходу опытов, сведения о себе и т. п.). Условия проведения опытов подбира-

лись заранее при «обкатке» методики. Среди условий встречались следующие: экспозиция 5 сек, оцениваемые картинка не должны располагаться на диафильме длинными сериями с монотонным увеличением или уменьшением сходства. Данные протоколов вносились в ЭЦВМ.

Образец кадра приведен на рис. 1. Видны оцениваемое неполное изображение и его эталон, индекс кадра и шкала сходства, представляющая собой цифры с картинками. Каждая картинка иллюстрирует цифру, которая показывает выраженную в баллах силу сходства этой картинке с эталоном шкалы. Оценке в 0 баллов соответствовало пустое поле, оценке в 10 баллов — эталон шкалы. Процедура составления шкалы описана в работах [2, 3].

Выявление функций, описывающих экспертные оценки сходства

Отыскиваемая в данных экспертизы математическая модель оценки сходства представляет собой формулу, в которую подставляются совокупности чисел, описывающих эталонную и измеряемую картинку. Оценки, вычисляемые по этой формуле, должны приближаться к среднеэкспертным. Для достижения требуемой точности приближения в формуле могут предусматриваться свободные параметры, значения которых определяются по результатам экспертизы сходства вспомогательных наборов изображений.

Оценки сходства осмысленных изображений в значительной мере зависят от эталона, из которого они были изготовлены. В этом убеждает сопоставление среднего превышения экспертных оценок, пересчитанных из баллов в относительные единицы и осредненных по испытуемым, над числами которых указывают коэффициент заполнения контура. Упомянутым показателем среднего превышения можно характеризовать «прочность» эталона по отношению к случайным стирающим помехам. Эти показатели, соответствующие отдельным эталонам, приведены на рис. 2. Они подсчитывались по формуле

$$\lambda = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \left(S_k - \frac{n_k}{n_3} \right) \frac{n_3}{n_k}.$$

В этом выражении λ — среднее превышение экспертных оценок S_k над коэффициентами заполнения контура $\frac{n_k}{n_3}$, где n_k — число штрихов в k -й оцениваемой картинке, а n_3 — число штрихов в ее эталоне. В наших данных $n_3 = 50$, $m = 70$, $S_k = \frac{S_k}{S_3}$; S_k — средняя экспертная оценка сходства k -го изображения с его эталоном, S_k — то же в баллах, S_3 — баллы эталона.

Кроме разброса оценок изображений, составленных из одинакового количества штрихов, который связан с «прочностью» эталона, значительный разброс оценок наблюдается и у изображений, приготовленных из одного эталона. На экспертные оценки влияет расположение сохранившихся штрихов по плоскости изображения. Низкие оценки обычно получают картинки со скученными штрихами, а высокие — те, где штрихи равномерно разбросаны по плоскости изображения.



Рис. 2. Эталоны и показатели их «прочности».

Несмотря на штриховой характер оцениваемых изображений, на оценки сходства влияет характер тех участков силуэта, в которых располагаются передаваемые штрихи. Передача штрихов, сосредоточенных на выпуклых частях силуэта, чаще сопровождается более высокими оценками, чем проработка вогнутых частей силуэта и линий, расположенных внутри его. Эти факты допустимо интерпретировать в терминах значений отдельных частей эталона, но, что особенно интересно, их можно описать чисто формально. Формальное описание, предсказывающее среднее экспертные оценки, строится по формуле представления функции многих переменных суперпозицией функций одного переменного. Двоичные признаки $x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_n$, индицирующие сохранение соответствующих штрихов на неполных изображениях, образуют измеримый комплекс свойств. Это подтверждается тем, что дополнение неполной картинке не увеличивает ее сходство с эталоном. Двоичный характер x_1, x_2, \dots, x_n обуславливает

линейную структуру промежуточных переменных. Кроме того, $S(x_1, x_2, \dots, x_n)$ при $x_1 = 0, x_2 = 0, \dots, x_n = 0$, и все промежуточные переменные имеют вид

$$\sum_i w_{ij} x_j = v_i l_i,$$

где

$$0 < v_i < 1 \text{ и } l_i = \sum_j w_{ij}.$$

Функция, описывающая оценки сходства, ищется в виде $f = \sum_k a_k \eta_k(v_k, \beta_k)$. Правила группировки x_j в промежуточные переменные и генерирования нелинейных преобразований η , задаваемых параметром β_k , достаточны для формального предсказания среднеэкспертных оценок и имеют простой геометрический смысл, а именно: распределения w_{ij} на плоскости изображения представляются круговыми рецептивными полями, весовые коэффициенты убывают с удалением от центра зоны по колоколообразному закону; нелинейные преобразования имеют логарифмический характер и их конкретный вид задается параметром β . Такое построение формулы обеспечивает согласование с повышением и снижением оценок в зависимости от расположения сохранившихся штрихов на плоскости изображения; согласование с «прочностью» эталона осуществляется параметром β . Расширение ассортимента рецептивных полей и, в частности, использование полей эллиптической формы, не повышает точность формального предсказания оценок.

Программа отбора рецептивных полей, которые необходимы для описания сходства изображений, приготовленных из одного эталона, построена по схеме синтеза экономных описаний в неминимальных сигнальных алфавитах. Эта итеративная процедура, с помощью которой на каждом шаге линейная комбинация $\sum a_k \eta_k$ пополняется функцией η_l , обеспечивающей в комбинации с $\sum a_k \eta_k$ самое сильное сокращение определяемой на учебной выборке среднеквадратической ошибки описания экспертных оценок. Через 6—7 шагов процедура отбирает смесь, достигающую среднеэкспертной точности. После этого на изображениях, не использованных при обучении, проводится экзамен. Деление массива оцененных изображений на учебную и контрольную выборки рандомизировано. Расположение материалов обучения и экзамена представлено на рис. 3, где каждая картинка показана точкой, абсцисса которой задается экспертной оценкой, а ордината — формальной. При сопоставлении функций η_k , выбранных программой (a_k выбранных η_k положительны, остальные равны нулю), с эталонами было обнаружено, что степень нелинейности преобразований, отбираемых программой для аппроксимации экспертных оценок, ранжируется согласно ранжировке эталонов по их «прочности». Тем самым β определяется λ , а все β_k для одного эталона

устанавливаются одинаковыми. Во всех вычислительных экспериментах с рецептивными полями разных размеров поле было большим и центр его располагался вблизи «центра» всего эталона. Было отмечено также несколько полей средних размеров, центры которых располагались вне зоны суммации первого поля и вблизи от центров скоплений штрихов эталона, остающихся

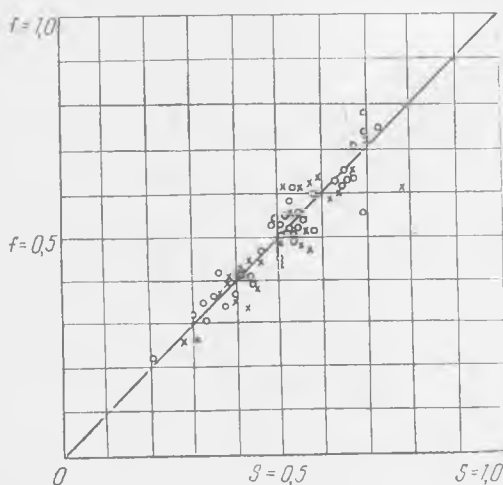


Рис. 3. Расположение экспертных и формальных оценок неполных изображений (эталон — лампа, о — обучение, х — экзамен).

при стирании штрихов, покрытых большим полем. Могли быть поля еще меньших размеров. Они располагались на скоплениях штрихов, покрытых более крупными полями. В зависимости от обучающей выборки отбираемые поля несколько различались, но общая картина их расположения оставалась прежней. Сохранялась также ранжировка коэффициентов, с которыми суммировались функции, соответствующие этим полям. Наибольший коэффициент (0,7 — 0,8) приходился на большое центральное поле. Поля меньших размеров порождали функции, входящие в формулу оценки

сходства с более низкими коэффициентами.

Возможность отбора промежуточных переменных без обучающих экспертиз

Повторяемость в расположении полей, отбираемых обучаемой программой, и в ранжировке весовых коэффициентов позволяет представить результаты вычислительных экспериментов в виде гипотезы о возможном механизме отбора промежуточных переменных. Основанием для этой гипотезы служит параллельная обработка информации, которая, по данным многих исследователей, осуществляется в живых системах. Входная информация одновременно перерабатывается в большом количестве каналов, часть которых используется, а сигналами от остальных практически пренебрегают. Ценой такой избыточности достигается быстрое действие и надежность. Избыточность затрудняет выбор промежуточных переменных в формуле для оценки сходства. Организация этого выбора требует сведений об используемом экспертами принципе отбора каналов. Если учесть близость задачи об

оценке сходства к задаче об оценке вероятности сохранения штриха эталона при случайных стираниях, то каждую промежуточную переменную можно рассматривать не только как полуфабрикат компоненты оценки сходства, но и как оценку вероятности, определяемую на конечной выборке. Когда в зоне пересечения рецептивных полей эталон не имеет штрихов, эти оценки оказываются независимыми, а выборки — неперекрывающимися. Как известно, точность объединенной оценки вероятности лучше, если отдельные оценки производятся на неперекрывающихся выборках.

Для каждого эталона можно построить разные варианты расположения рецептивных полей, в пересечениях которых отсутствуют штрихи эталона.

Если функции, описывающие сумму в пределах поля, нормировать так, чтобы сумма коэффициентов поля по совокупности элементов раstra была одинаковой у всех полей, то максимальные значения переменных будут оценивать локальные плотности эталона. Поля с низкой плотностью штрихов можно отбросить, а среди оставшихся выделить такие, которые имеют самую высокую плотность при наибольших размерах и наименьших перекрытиях на элементах эталона. В терминах многоканального приема максимальная плотность при наибольших размерах означает получение возможно лучших отношений (сигнал/шум) в отдельных каналах, а уменьшение перекрытий соответствует выбору каналов с некоррелированными помехами.

В заключительных вычислительных экспериментах, проводимых с целью проверки выдвинутой гипотезы, центры зоны подбирались вручную.

Эталон покрывался кружками разных размеров (эти размеры соответствовали размерам зон). Сначала укладывался крупный кружок, центр которого помещался вблизи центра тяжести картинки.

Затем укладывались круги меньших размеров. При этом задачей было повышение плотности и размеров, а также сокращение числа полей и их перекрытия на элементах эталона.

Процедуру укладки полей можно автоматизировать, используя алгоритм синтеза экономных описаний, предназначенный для решения задачи об аппроксимации равномерного «обслуживания» элементов эталона из небольшого числа источников «внимания», расположенных в центрах используемых зон.

Процедура подбора зон хорошо согласуется с особенностями формирования зрительного образа предмета, сближающегося с испытываемым [4].

Для большего согласия процедур можно было бы ввести правила, обеспечивающие обнаруженное в этих исследованиях преимущество верхних и правых полей при выборе дополняющих зон.

Если бы оценивалась вероятность сохранения штрихов, то оценки, полученные в разных зонах, следовало сложить с весами, пропорциональными максимальным уровням сигналов в этих зонах. Это обосновывается практикой обработки неравноточных наблюдений и теоремой Бреннана о правилах сложения радиосигналов при разнесенном приеме [5]. Однако оценка сходства отличается от оценки вероятности нелинейным преобразованием частных оценок.

Распределение весов в процессе оценки сходства оказывается таким же, как при объединении оценок вероятности, что позволяет объяснять особенности человеческой оценки сходства известными особенностями субъективных представлений о частотах одинаковых исходов в сериях случайных испытаний.

Согласно этим предположениям [6], противоречащим статистическим данным, следует ожидать одинаковых частот.

Логарифмическими преобразованиями эти представления вводятся в формулу оценки сходства. Функция оценки сходства

$$f(v_1, v_2, \dots, v_n) = \frac{\sum \alpha_i \log(1 + \beta v_i)}{\log(1 + \beta) \cdot \sum \alpha_i},$$

где

$$v_i l_i = \sum w_{ij} x_j; \quad 0 \leq v_i \leq 1; \quad \sum v_i l_i = v_{\text{ср}} \sum l_i$$

достигает максимального (при $\alpha_1/l_1 = \alpha_2/l_2 = \alpha_i/l_i = \dots = \alpha_n/l_n$) значения, если $v_1 = v_2 = \dots = v_{\text{ср}}$.

Превышение f над $v_{\text{ср}}$ определяется параметром β , величину которого можно связать со значением среднего превышения экспертных оценок над коэффициентами заполнения контура.

Для построения чисто формальной теории оценки сходства неполных контурных изображений необходимо выработать правила оценки параметра β по геометрическим свойствам эталона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колмогоров А. Н. О представлении функций нескольких переменных суперпозиций непрерывных функций. «Докл. АН СССР, 1965, т. 14, № 5, с. 953—956.
2. Махонин В. А., Нарбутис Е. И., Савельев В. П. Об оценках сходства для автоматического опознавания. Сб. «Информационно-поисковые системы и автоматическая обработка научно-технической информации», т. III. М., ВИНТИ, с. 91—106.
3. Дюндина В. С., Махонин В. А., Нарбутис Е. И., Степанов В. Г. Изучение сходства для индикации контурных изображений. «Тр. III Всесоюз. конф. по авиации и космической медицине», т. I. М., 1969, с. 19—30.
4. Ломов Б. Ф. Человек и техника. М., «Сов. радио», 1966. 466 с.
5. Лекции по теории систем связи. М., «Мир», 1964. 402 с.
6. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. М., «Мир», 1967. 498 с.

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ МОДЕЛЕЙ ОДНОРОДНЫХ БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ЛАТЕРАЛЬНЫМ ТОРМОЖЕНИЕМ И РАСПРОСТРАНЯЮЩИМСЯ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Ф. Д. Дубинин

Функционирование многих биологических объектов целесообразно анализировать путем представления их в виде однородных, «континуальных» структур. Это относится к биологическим системам с распространяющимся возбуждением и к системам с латеральным торможением [1—4]. Континуальный метод используется в процессе синтеза вычислительных и управляющих систем [5, 6]. Известны однородные модели континуальной среды — электрохимические [7], сверхпроводящие [8], полупроводниковые (нейристорные). Большинство этих моделей воспроизводят функциональные черты биологических систем с распространяющимся возбуждением. В настоящей работе рассматриваются некоторые способы физической реализации моделей, воспроизводящих эффект распространяющегося возбуждения и латерального торможения. При гибкой перестройке параметров предлагаемых моделей свойства обеих моделируемых биологических систем удастся сочетать в одной полупроводниковой слоистой структуре. Для реализации такой перестройки используется зависимость параметров полупроводниковых соединений групп $A^{IV}B^{VI}$ и $A^{III}B^{V}$ от электрических и оптических воздействий.

В конструктивном отношении модели — это плоские многослойные оптоэлектронные системы, состоящие из полупроводниковых пленок (однородные модели) или из регулярной сети отдельных мозаик (мозаичные модели). Входная и выходная информация представлена в форме двумерных оптических изображений.

Однородные модели биологических систем с латеральным торможением (МЛТ) и распространяющимся возбуждением (МРВ)

Основной частью МЛТ является электролюминесцентный усилитель света (ЭЛУ). Схемы модели приведены на рис. 1. Входное изображение проектируется на фоточувствительную плоскость ЭЛУ, выполненную из монокристаллического CdS , максимум чувствительности которого находится в области спектра с длиной волны $\lambda_1 = 550$ нм. Выходным сигналом служит изображение, излучаемое электролюминесцентным слоем ЭЛУ. Латеральное торможение воспроизводится благодаря эффекту инфракрасного гашения фотопроводимости монокристаллического CdS под

воздействием света, длина волны которого $\lambda_2 = 750\text{--}1500$ нм при активирующем зеленом свете с длиной волны $\lambda_1 [g]$ *.

Эффект ИК-гашения становится максимальным при $\lambda_2 = 800$ и 1400 нм. Гашение эффективно в том случае, когда интенсивность ИК-облучения на 2—3 порядка выше интенсивности активирующего облучения. В модели с прямым латеральным торможением изображение, содержащее в своем спектре волны λ_1 и λ_2 , расщепляется оптической системой 9 на два одинаковых изображения, которые после прохождения через фильтры 10, 11 и оптические системы 4, 5 подаются на вход ЭЛУ (рис. 1, а). Фильтр 10 выделяет зеленую полосу (λ_1), фильтр 11 — инфракрасную (λ_2). В модели с обратным торможением входное изображение проектируется на фоточувствительную поверхность ЭЛУ, а выходное изображение ЭЛУ (длина волны излучения λ_1 , если люминофор изготовлен на основе ZnS, Cu) посредством преобразователя спектра 3 превращается в ИК-изображение и через оптическую систему 6 подается на входную плоскость ЭЛУ (рис. 1, б).

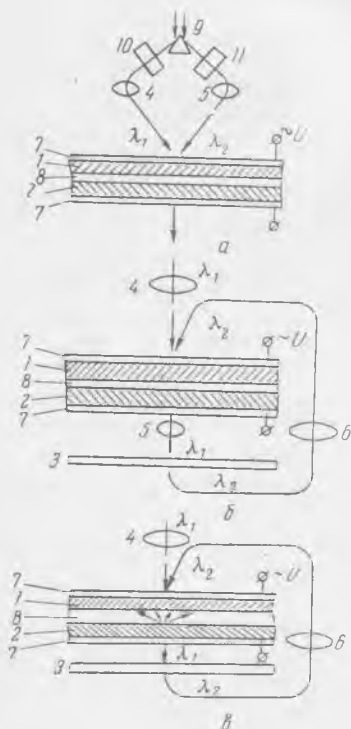


Рис. 1. Конструктивная схема однородных моделей:

а — МЛТ с прямым торможением; б — МЛТ с обратным торможением; в — МРВ; 1 — монокристаллический CdS; 2 — электролюминофор; 3 — преобразователь спектра; 4, 5, 6 — оптические системы; 7 — прозрачные электроды; 8 — промежуточный слой; 9 — оптическая расщепляющая система; 10, 11 — оптические фильтры;

Входными и выходными сигналами служат оптические изображения, первое из которых в течение долгого или короткого времени проектируется на входную плоскость оптрона, а второе излу-

* Представляется перспективным использовать для воспроизведения латерального торможения эффект отрицательной фотопроводимости.

чается электролюминофором в виде динамической картины бегущих световых волн. Эффект распространения светового возбуждения достигается за счет «растекания» светового пятна по поверхности оптрона вследствие передачи изображения по каналу положительной обратной связи в расфокусированном виде. Скорость «растекания» световой волны зависит в основном от инерционности фоторезистора.

Возникновение и перемещение рефрактерной, темной зоны вслед за возбужденной, светящейся зоной по плоскости оптрона происходит благодаря обратному латеральному торможению. Последнее реализуется так же, как и в МЛТ с обратным торможением: светящийся участок электролюминофора оптрона активирует тормозящее воздействие, направленное на прилегающий фоточувствительный слой; в результате через некоторое время, определяемое инерционностью цепи гашения, данный участок оптрона гаснет.

Схема однородной МРВ приведена на рис. 1, в. Компоненты МРВ аналогичны МЛТ (рис. 1, б), с той лишь разницей, что промежуточный слой в МРВ прозрачен. Это позволяет реализовать оптическую положительную обратную связь от люминесцентного слоя к фоточувствительному.

Мозаичные МЛТ и МРВ

При переходе к мозаичной структуре в целях выявления ее преимуществ следует изменить некоторые принципы построения схемы моделей. Если в однородной системе эффектом, имитирующим латеральное торможение, служит ИК-гашение фотопроводимости, то в мозаичной структуре для этого используется шунтирование электролюминесцентного конденсатора фоторезистором (рис. 2, б).

Модель состоит из одинаковых, параллельно включенных ячеек и управляется двумя световыми потоками. Первый из них — возбуждающий — активирует последовательный фоторезистор $\Phi П$, что вызывает увеличение яркости люминесценции, а второй — тормозящий — активирует шунтирующий фоторезистор $\Phi Ш$, вследствие чего уменьшается яркость люминесценции.

Разделение световых потоков может быть чисто пространственным, если $\Phi П$ и $\Phi Ш$ оптически взаимно-изолированы и смешивание световых потоков исключено. Разделение может быть осуществлено также за счет разного спектрального состава световых потоков, соответственно фоторезисторы должны иметь различную спектральную чувствительность. В качестве фоторезисторов в мозаичной модели допустимо применять как монокристаллические (в целях сужения полосы спектральной чувствительности), так и поликристаллические материалы. Интенсивности возбуждающих и тормозящих световых потоков при использо-

вании шунтирующих (тормозящих) фоторезисторов, в отличие от однородных моделей с ИК-гашением, в принципе могут быть одинаковыми.

Однослойные модели

Мозаичную структуру можно выполнить таким образом, что все ее детали будут размещены в одной плоскости. Подобное размещение возможно, если для электрического соединения

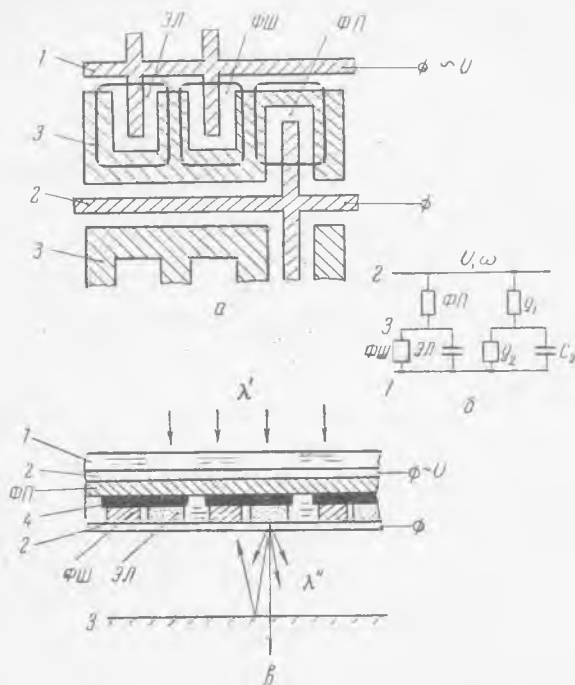


Рис. 2. Мозаичные модели:

a — однослойная модель; 1, 2 — шины питания; 3 — шины внутренних связей; ЭЛ — электролюминофор; ФШ — шунтирующий фоторезистор; ФП — последовательный фоторезистор; *b* — принципиальная электрическая схема модели; *в* — многослойная модель; 1 — стеклянная подложка; 2 — проводящий прозрачный электрод; 3 — зеркала; 4 — проводящий электрод.

отдельных компонентов мозаики применить так называемые «гребенчатые» электроды, нанесенные на поверхность пассивного диэлектрического основания (обычно стеклянного).

Расположение электродов и полупроводниковых компонентов показано на рис. 2, *a*, где представлен один элемент мозаики, регулярно повторяющийся на плоскости. Электроды выполняются из металлической пленки или из SnO_2 . Последовательный и шунтирующий фоторезисторы модели имеют разнесенные по

спектру максимуму спектральных характеристик и изготавливаются, например, из поликристаллического CdS и CdSe с максимумами при $\lambda = 510\text{--}550$ и 660 нм соответственно. При этом целесообразнее использовать монокристаллические фоторезисторы вследствие более острой характеристики их спектральной чувствительности и, как результат, снижения влияния возбуждающего облучения на шунтирующие фоторезисторы или тормозящего облучения на последовательные фоторезисторы.

Мозаичная МЛТ с прямым торможением показана на рис. 3, а. Здесь λ_1 и λ_2 — длины волн возбуждающего и тормозящего светового потока соответственно. Изображение (диапозитив 1) облучается световым потоком, в состав которого входят волны λ_1 и λ_2 . Световой поток расщепляется оптическим устройством 3 на два одинаковых изображения, каждое из которых проходит через фильтр 4 и оптическую систему 5. При этом левый поток становится монохроматическим с длиной волны λ_2 , а правый — с λ_1 . Оба световых потока снова собираются в одной области плоскости модели 2. Электролюминофор модели осуществляет излучение при длине волны λ_3 . Токпроводящие покрытия могут быть как прозрачными, так и непрозрачными. От этого зависит лишь направление выходящего излучения. Длина волны λ_3 излучения электролюминофора может быть произвольной. В случае $\lambda_3 = \lambda_1$ или $\lambda_3 = \lambda_2$ необходимо оптически изолировать люминофор от фоторезисторов из-за вероятности боковой засветки.

МЛТ с обратным торможением представлена на рис. 3, б (для непрозрачных электродов) и в (для прозрачных). Оптическая система состоит из полупрозрачного зеркала б, электролюминофор изготовлен из материала, длина волны излучения которого λ_2 , что соответствует максимуму спектральной чувствительности шунтирующего фоторезистора. Отраженное от зеркала излучение люминофора создает тормозящий эффект, активируя

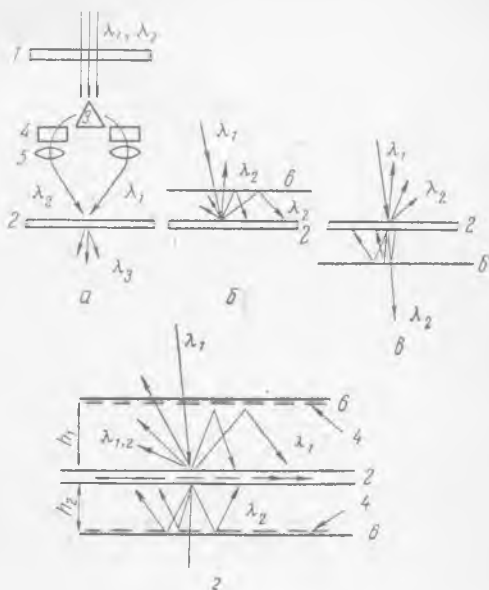


Рис. 3. Прохождение световых потоков в мозаичных моделях:

а — МЛТ с прямым торможением; б, в — МЛТ с обратным торможением; 1 — диапозитив; 2 — плоскость модели; 3 — оптическая расщепляющая система; 4 — оптические фильтры; 5 — фокусирующие системы; б — зеркала.

шунтирующие фоторезисторы. Мозаичная МРВ с прозрачными электродами показана на рис. 3, *г*. Люминофор составлен из смеси двух компонентов, излучающих в двух полосах спектра λ_1 и λ_2 , например, из ZnS, Cu и ZnSe, ZnS, CdSe. Оптические системы, формирующие световые потоки для осуществления положительной обратной связи и рефрактерной (тормозной), в простейшем случае состоят из полупрозрачных зеркал 6, снабженных отражающими фильтрами 4. Верхнее зеркало отражает лишь в полосе λ_1 и тем самым формирует световой поток для поддержания генераторного режима. Нижнее зеркало отражает только в полосе λ_2 и тем самым формирует световой поток, срывающий световую генерацию. Изменяя расстояния h_1 и h_2 между зеркалами и фоточувствительной плоскостью модели, можно повысить или уменьшить коэффициенты обратных связей в целях возбуждения и рефрактерности. Так, при увеличении h_1 коэффициент положительной обратной связи падает, а модель превращается в МЛИ с обратным торможением. Функция связи S для зеркальной системы описывается уравнением

$$S = \frac{\pi}{2} \left[1 - \frac{H^2 + (m - k)^2 - a^2}{\sqrt{[H^2 + (m - k)^2 + a^2]^2 - 4a^2(m - k)^2}} \right], \quad (1)$$

где m и k — координаты (для одномерной модели) излучающего и облучаемого элемента мозаик соответственно; a — радиус излучающего элемента; H — удвоенное расстояние от плоскости модели до зеркала [10].

Многослойные модели

Построить многослойную модель — значит нанести проводящий электрод 4 на электролюминофор и шунтирующий фоторезистор, как это показано на рис. 2, *в*. На стеклянное основание 1 наносится прозрачный электрод 2 и слой поликристаллического фоторезистора ФП. С одной стороны шунтирующий фоторезистор ФШ и электролюминофор ЭЛ параллельно соединены токопроводящим покрытием 4, а с другой — прозрачным общим электродом 2.

Преобразование информации в мозаичной МЛТ с прямым латеральным торможением

Вид преобразования моделью оптического входного сигнала — расширение, обострение, инвертирование, выделение контуров — во многом зависит от формы входного сигнала и типа возбуждающей (S_B) и тормозящей (S_T) функций связи [1]. Приведем расчетные эпюры для мозаичной МЛТ (в статике) с прямым торможением (рис. 3, *а*). Рассмотрим одномерный случай. Примем, что возбуждающее изображение сфокусировано на входной плоскости МТЛ ($S_B = \delta$ -функции), а тормозящее — расфокуси-

вано (S_T) и описывается монотонной колоколообразной функцией, в частном случае — уравнением (1).

В области малых освещенностей E_k модель описывается уравнениями (рис. 2, б)

$$g_{1m} = a_1 \sum_{k=1}^n S_B E_k + g_T; \quad (2)$$

$$g_{2m} = a_2 \sum_{k=1}^n S_T E_k + g_T; \quad (3)$$

$$S = \varphi |k - m|; \quad (4)$$

$$U_{3,m} =$$

$$= U \frac{g_{1m}}{\sqrt{(g_{1m} + g_{2m})^2 + g_3^2}}; \quad (5)$$

$$B_m = a_3 U_{3,m}^2; \quad (6)$$

где B_m — яркость свечения электролюминесцентной ячейки мозаики с координатой m .

Принимая электролюминофор порошковым, а фоторезисторы — поликристаллическими, для расчета, согласно (11), задаемся параметрами $g_T = 0,59 \cdot 10^{-8} \text{ ом}^{-1}$; $g_3 = \omega C = 0,196 \times 10^{-6} \text{ ом}^{-1}$; $a_1 = a_2 = 0,85 \cdot 10^{-6} \text{ ом}^{-1} \cdot \text{лк}^{-1}$; $\gamma = 3,56$; $a_3 = 0,12 \cdot 10^{-6} \text{ нм} \cdot \text{в}^{-1}$; $n = 15$.

При построении используем S_T колоколообразной формы:

$k - m$	0	±1	±2	±3	±4	±5	±6
S_T	1	0,8	0,4	0,15	0,07	0,01	0
S_B	1	0	0	0	0	0	0

На рис. 4 приведены эпюры входных E_k и выходных B_m пространственных функций при заданных S_T и U . Из сравнения кривых B_m и E_k следует, что в МЛТ с указанными выше S_T и S_B происходит переработка входного сигнала в форме выделения контуров входного изображения аналогично тому, как омматидии *Limulus* [2] реагируют на перепады яркости (кривая B_m^c). В том случае, когда S_T выражается δ -функцией, а S_B — колоколообразной, возникает эффект «инвертирования» (кривая B_m^i).

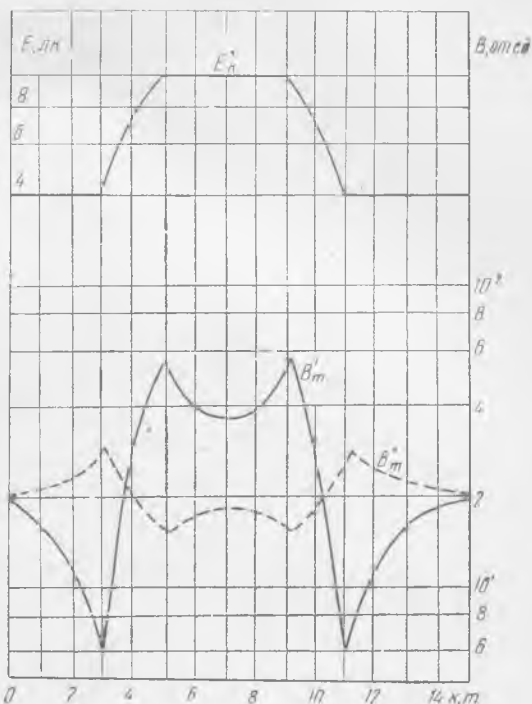


Рис. 4. Эпюры пространственных функций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Люблинский И. А., Позин Н. В., Яхно В. П. Анализ моделей однородного нейронного слоя с латеральными связями. «Автоматика и телемеханика», 1967, № 10, с. 15—19.
2. Kirschfeld K., Reichardt W. «Kybernetik», 2, 2 (1963). s. 43.
3. Кринский В. Н. Фибрилляция в возбудимых средах. Сб. «Проблемы кибернетики», вып. 20, М., «Наука», 1960, с. 97—103.
4. Смолянинов В. В. О некоторых особенностях организации коры мозжечка. Сб. «Модели структурно-функциональной организации некоторых биологических систем». М., «Наука», 1966, с. 76—77.
5. Прангишвили И. В. и др. Микроэлектроника и однородные структуры для построения логических и вычислительных устройств. М., «Наука», 1967. 228 с.
6. Самойленко Ю. И. О разрешающей способности пространственно распределенных систем управления. «Изв. АН СССР, Техн. кибернетика», 4, 154 (1966).
7. Стюарт Р. Электрохимические модели нервных волокон. ТИИЭР, 52, 1 (1964). 83 с.
8. Беркович С. Я. Сверхпроводящая модель проведения нервного импульса. «Радиотехника и электроника», 11, 2 (1966), с. 53—54.
9. Vube R. «Phys. Rev.», 99, 4, 1105 (1955), p. 1105.
10. Фок В. А. Освещенность от поверхностной произвольной формы. «Тр. гос. оптического ин-та», вып. 28, М., 1924, с. 13—17.
11. Молчанов А. А. и др. Исследование статического режима оптрона с положительной обратной связью. «Электронная техника», сер. 6, вып. 2, 1971, с. 39—41.

К ВОПРОСУ О СОЗДАНИИ АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ ТРИАНГУЛЯЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ С ВОЗМОЖНЫМ УЧАСТИЕМ ОПЕРАТОРА В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОЙ ИНФОРМАЦИИ

В. А. Горбачев, А. Г. Евдокимов, В. В. Матейченко

Разнообразные статистические данные уже долгое время обрабатываются по алгоритмам, реализуемым на ЭВМ, и роль человека здесь сведена к минимуму. Можно ли, однако, считать, что в этой области приоритет принадлежит машине? Не лучше ли в сложных системах отводить ей роль советчика, по крайней мере, до тех пор, пока кибернетические устройства не избавятся от присущего им недостатка снижать эффективность решений в условиях неполной информации? В настоящей статье на конкретном примере показано снижение эффективности одного машинного алгоритма в условиях более широкой неопределенности, предложен эффективный машинный алгоритм.

Рассмотрим задачу об обработке наблюдений, полученных от триангуляционной системы измерения координат точки в условиях неполной информации.

По современной теории ошибок, необходимо одновременное рассмотрение трех видов неконтролируемых факторов, обуславливающих погрешности измерения: фиксированных факторов, зна-

чения которых известны (такими могут быть, например, число и точность измерений, степень их зависимости и т. д.); случайных фиксированных факторов, т. е. случайных процессов с известными законами распределения; неопределенных факторов, для которых известна только область распределения факторов, внутри которой они могут находиться, если фактор случаен, но закон распределения точно не определен.

Рассмотрим неопределенные факторы как конечное множество выбранных из физических соображений законов распределения и принадлежащих области возможных законов распределения ошибок.

Иными словами, априорно предположим, что плотность распределения ошибок измерения представляет собой смесь плотностей отдельных «стратегий природы» вида

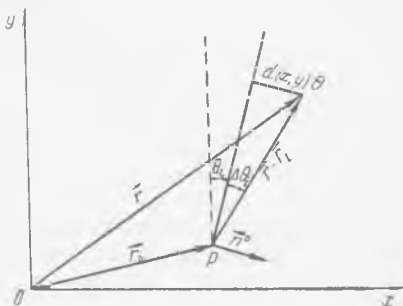


Рис. 1.

$$\bar{f}_k(\bar{\Delta\theta}) = \sum_{s=1}^k p_s \bar{f}_s(\bar{\Delta\theta}), \quad (1)$$

где $\bar{\Delta\theta} = \Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \dots, \Delta\theta_n$ — ошибки триангуляционных измерений; $f_s(\Delta\theta)$ — плотность распределения s -й стратегии природы; p_s — вероятность появления данной плотности.

Координаты точки на плоскости по данным угломерных измерений определяются следующим образом. Пусть угломерный измеритель p_i и искомая точка Q расположены в плоскости xOy (рис. 1), r — радиус-вектор точки Q , а r_i — радиус-вектор положения измерителя угла θ_i . Вследствие того что угол θ_i измерен с ошибкой $\Delta\theta_i$, линия положения не пройдет через точку Q . Уклонение $d(x, y)$ линии положения определяется величиной скалярного произведения единичного вектора $\bar{n}^0 = \bar{x}^0 \cos \theta_i - \bar{y}^0 \sin \theta_i$ и разности векторов $\bar{r} - \bar{r}_i$:

$$d_i(x, y) = (\bar{r} - \bar{r}_i) \bar{n}^0, \quad (2)$$

где \bar{x}^0 и \bar{y}^0 — единичные орты координатной системы.

Условие отсутствия ошибок i -го измерителя (идеальный случай) записывается в виде

$$d_i(x, y) = (\bar{r} - \bar{r}_i) \bar{n}^0 = 0. \quad (3)$$

Будем считать измерение Θ_{ij} аддитивной смесью полезного сигнала (истинного угла) Θ_i и ошибки $\Delta\Theta_{ij}$:

$$\Theta_{ij} = \Theta_i + \Delta\Theta_{ij}, \quad (4)$$

где i — номер измерителя;

j — номер измерения.

Тогда выражение (2) для i -го уклонения можно записать в виде

$$d_i(x, y) = (x - x_i) \cos(\Theta_i + \Delta\Theta_{ij}) - (y - y_i) \sin(\Theta_i + \Delta\Theta_{ij}). \quad (5)$$

Выражение (5) позволяет получить необходимые и достаточные условия для определения координат местоположения объекта в триангуляционных измерениях: 1) наличие как минимум двух измерений из двух точек; 2) разнесение этих точек в пространстве.

Невыполнение условий 1)—2) исключает возможность принципиального решения системы (5). Условие 2) требует особого внимания. Слабое разнесение точек, из которых производятся измерения, порождает плохо обусловленную несовместную в случае избыточности ($i \geq 3$) измерений систему линейных (при условии малости углов) уравнений.

Плохо обусловленной называется такая система линейных уравнений, если в первом приближении уравнения почти линейно зависимы.

Тем не менее применение избыточных измерений, необходимое для того, чтобы ошибки не входили целиком в корни системы и открывали возможность для их частичной взаимной компенсации [1], вынуждает нас решать именно такую систему уравнений. Единственно, что можно предпринять для уменьшения плохой обусловленности системы, — это воздействовать на контролируемые факторы, т. е. добиваться такого размещения координат измерителей (x_i, y_i) , чтобы истинные углы максимально отличались один от другого. Можно показать [2], что координаты размещения в этом случае находятся в вершинах правильного n -угольника, центр симметрии которого совпадает с центром района контроля (района априорного местонахождения точки на плоскости). Принцип пространственного распределения, осуществляемый при этом, является одним из перспективных способов извлечения информации из окружающей среды, особенно в случае помех.

Таким образом, повышение точности необходимо рассматривать в рамках теории оптимального планирования эксперимента. Эта теория основывается на композиции методов решения экстремальных задач (в нашем случае — задачи об оптимальном размещении n измерений) и математической статистики (статистической интерпретации наблюдений).

Рассмотрим статистические свойства системы триангуляционных измерений, удовлетворяющих принципу пространственного раз-

мещения и, следовательно, позволяющих извлекать максимальное количество информации из среды при фиксированном числе измерений. В общем случае из среды при этом извлекается также более обширный диапазон помех, существенно изменяющих вид закона распределения ошибок системы (математическую модель ошибок).

Общепринятыми моделями ошибок измерения являются:

а) модели схемы измерений одинаковой точности (равноточная математическая модель);

б) модели схемы неравноточных измерений (неравноточная модель).

Будем считать, что стратегии природы s могут относиться к первой и второй категориям моделей. В случае равноточной схемы измерений положим, что ошибки распределены не только по нормальному закону, но и по равномерному (последний, например, имеет место при округлении величины в автоматических измерительных устройствах). Остановимся на моделях неравноточной схемы измерений.

Так, если произвести m независимых угломерных измерений в одной точке пространства и l измерений — в другой ($m + l = n$), то можно считать, что качество измерений в точке одинаково, но скорее всего различно между двумя точками из-за разницы в конкретных условиях измерения. Полагая $f_s(\Delta\theta)$ нормальной $(N, 0)$, приходим к обобщенному нормальному закону распределения, описывающему неравноточные измерения [3]:

$$f(\Delta\theta) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(p_1 h_1 e^{-\Delta\theta^2 h_1^2} + p_2 h_2 e^{-\Delta\theta^2 h_2^2} \right). \quad (6)$$

Здесь h — гауссова мера точности.

В общем случае плотность вероятности неравноточной системы при обобщенном нормальном законе имеет вид

$$f(\Delta\theta) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sum_{i=1}^z h_i p_i e^{-\Delta\theta^2 h_i^2}, \quad (7)$$

где z — число групп с различными мерами точности.

Характерной особенностью таких распределений [3] является положительность четвертого момента (экссесса) — островершинность одномодальных распределений. Это позволит говорить о большем потенциальном запасе полезной информации в смеси сигнала с такой помехой по сравнению с нормальной.

В непосредственном виде использование формулы (7) обобщенного нормального закона затруднительно, так как неизвестны ни число групп z , отличающихся лишь параметрами гауссовых мер точности h_i или связанными с ними значениями среднеквадратичных отклонений $\left(\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}h_i} \right)$, ни их вероятности. Доопределим эти величины с целью конкретизации математической модели ошибок для рассматриваемой системы.

1. Положим число групп равным числу измерений $z = h$, т. е. размерности вектора $\Delta\theta$ в (1). Это соответствует предположению, что измерения в различных точках среды не только взаимонезависимы, но и неравноточны.

2. Будем считать σ_i случайно распределенными по некоторому закону с известным параметром $\sigma_\sigma = \text{const}$. Подобную постановку задачи находим в [4], где был доопределен закон распределения дисперсий неравноточных наблюдений с $D_D = \text{const}$. Представляется целесообразным рассмотреть два вида обобщения нормального закона: нормально обобщенный нормальный закон и равномерно обобщенный нормальный закон (в обоих случаях по виду распределения σ_i).

Можно также произвести аналогичные обобщения по мере точности h_i , что будет соответствовать предположению о преобладании в системе некачественных измерений. Это видно из того, что при $h \rightarrow 0$ стремление $\sigma = \frac{1}{\sqrt{2h}}$ к бесконечности не характерно для большинства триангуляционных измерений. Данный случай может иметь место, например, при больших неконтролируемых систематических ошибках.

С учетом сказанного выражение (7) для нормального обобщения нормальных законов может быть рассмотрено следующим образом: если σ — случайная величина, принимающая значения $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ с вероятностями p_1, p_2, \dots, p_n , то $f_l(\Delta\theta) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{\pi}} e^{-\left(\frac{\Delta\theta}{\sigma_i}\right)^2}$ — условная плотность $\Delta\theta$ при условии $\sigma = \sigma_i$.

По формуле полной вероятности

$$f(\Delta\theta) = \sum_1^n p\{\sigma = \sigma_i\} f\{\Delta\theta/\sigma = \sigma_i\}. \quad (8)$$

Считая σ непрерывной величиной, в (8) сумму заменяем интегралом, а $P\{\sigma = \sigma_i\}$ — плотностью распределения $p(\sigma)$ и приходим к обобщенной формуле полной вероятности:

$$f(\Delta\theta) = \int_{-\infty}^{\infty} p(\sigma) f(\Delta\theta/\sigma) d\sigma. \quad (9)$$

Подставляя в (9) формулы одностороннего нормального закона (для σ) и нормального закона (для $\Delta\theta$)

$$p(\sigma) = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi\sigma_\sigma}} e^{-\frac{\sigma^2}{2\sigma_\sigma^2}}, & \sigma \geq 0, \\ 0, & \sigma < 0; \end{cases} \quad (10)$$

$$f(\Delta\theta/\sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{\Delta\theta^2}{2\sigma^2}}, \quad (11)$$

получаем аналитическую запись нормально обобщенного нормального закона распределения ошибок:

$$f(\Delta\theta) = \frac{1}{\pi\sigma_\sigma} \int_0^\infty \frac{1}{\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta\theta^2}{\sigma^2} + \frac{\sigma^2}{\sigma_\sigma^2}\right)} d\sigma. \quad (12)$$

Для равномерного обобщения нормального закона распределения ошибок

$$p(\sigma) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{12}\sigma_\sigma}, & 0 \leq \sigma \leq \sqrt{12}\sigma_\sigma, \\ 0, & \sigma < 0, \sigma > \sqrt{12}\sigma_\sigma. \end{cases} \quad (13)$$

Подставляя в (9) выражения (11), (13), аналитически записываем равномерно обобщенный нормальный закон распределения ошибок:

$$f(\Delta\theta) = \frac{1}{\sigma_\sigma \sqrt{24\pi}} \int_0^{\sqrt{12}\sigma_\sigma} \frac{1}{\sigma} e^{-\frac{\Delta\theta^2}{2\sigma^2}} d\sigma. \quad (14)$$

Определенные таким образом четыре типовые стратегии природы [$k = 4$ в выражении (1)] представляют собой многоситуационную модель ошибок одинаковой размерности вектора $\Delta\theta$ (одинаковое число измерений). Она характеризуется одной константой $\sigma = \sigma_\sigma = \text{const}$, которая находится из предварительных измерений в условиях неполной информации. В литературе достаточно подробно описана только одна стратегия — нормальная равноточная модель [2, 3, 5], и широко применяемый метод наименьших квадратов оптимален именно для нее. Из соображений удобства модель представлена в виде табл. 1.

Таблица 1

Вид ограничения	Тип компоненты модели			
	равноточные наблюдения		неравноточные наблюдения	
	1	2	3	4
Закон изменения $\Delta\theta$ с параметром σ	Нормальный	Равномерный	Нормальный	Нормальный
Закон изменения среднеквадратичного отклонения	$\sigma_i = \text{const}$	$\sigma_i = \text{const}$	Нормальный с параметром $\sigma_\sigma = \text{const}$	Равномерный с параметром $\sigma_\sigma = \text{const}$
Номер формулы распределения в тексте	(11)	—	(12)	(14)

В связи с этим возникает вопрос об эффективности метода наименьших квадратов при обработке данных триангуляционной системы с распределениями ошибок, соответствующими приведенной многоситуационной модели. Сложность аналитических расчетов в данном случае затрудняет точную теоретическую оценку эффективности.

Эффективность алгоритма метода наименьших квадратов оценивалась путем вероятностного моделирования триангуляционных ситуаций на ЭВМ, что позволило получить ориентирующие результаты. Сложные распределения (12) и (14) моделировались последовательным генерированием ε_i при постоянных ε_j и $\Delta\Theta_{ij}$ в случае найденного ε_i .

Кроме того, в настоящей работе для обработки результатов измерений триангуляционной системы в условиях неполной информации проверялся также разработанный нами алгоритм, дающий приближенное решение несовместной системы уравнений (5) в минимаксном смысле:

$$d^*(x, y) = \min_x \max_{1 \leq i \leq n} d_i(x, y). \quad (15)$$

При разработке алгоритма авторы исходили из свойства минимаксных методов обеспечивать наилучшее решение в наихудшей ситуации, к которой можно отнести и неполноту информации (малое количество наблюдений, различные и неизвестные стратегии природы и т. д.).

Оба алгоритма — метода наименьших квадратов и изложенный выше — обрабатывали одни и те же многоугольники засечек, образуемые путем вероятностного моделирования исходных ситуаций. Программы моделирования ситуаций и алгоритмы их обработки были реализованы на ЭВМ «Наири-2». Испытания проводились относительно «наилучшей» для алгоритма метода наименьших квадратов центральной точки района неопределенности при числе измерений от 3 до 10.

Результаты статистических испытаний приведены в табл. 2. Каждое из чисел в графах представляет собой усредненный результат по десяти выборкам данной стратегии природы. Роль функции потерь играла величина расстояния найденных в ходе обработки координат до истинных:

$$\Pi(x^*, y^*) = \sqrt{(x_u - x^*)^2 + (y_u - y^*)^2}, \quad (16)$$

где x_u, y_u и x^*, y^* — соответственно координаты истинной точки и найденной в ходе обработки системы (5).

Усреднение результатов табл. 2 по всем четырем стратегиям природы многоситуационной модели в условиях выбранного размещения показало, что алгоритм (15) эффективнее алгоритма метода наименьших квадратов в полтора раза (сравнить среднее верхней и нижней частей табл. 2), что позволяет говорить о неоптимальности алгоритма метода наименьших квадратов для данной модели.

Таблица 2

Алгоритм	n	Номер закона распределения из таблицы 1					
		1	2	3	4	3	4
Метода наименьших квадратов	3	0,056	0,051	0,050	0,111	0,038	0,101
	4	0,068	0,037	0,076	0,236	0,135	0,212
	5	0,039	0,050	0,046	0,111	0,030	0,060
	6	0,065	0,053	0,124	0,354	0,098	0,186
	7	0,042	0,043	0,126	0,118	0,058	0,028
	8	0,043	0,034	0,083	0,299	0,047	0,255
	9	0,036	0,035	0,045	0,129	0,012	0,048
	10	0,041	0,053	0,085	0,136	0,057	0,067
	Среднее . .	$\frac{1}{8} \sum_{n=3}^{n=10} \Pi_i$	0,0487	0,0445	0,0794	0,1867	0,0594
Минимаксный	3	0,056	0,051	0,050	0,106	—	—
	4	0,048	0,030	0,049	0,120	—	—
	5	0,041	0,051	0,047	0,105	—	—
	6	0,048	0,033	0,039	0,102	—	—
	7	0,045	0,037	0,052	0,095	—	—
	8	0,049	0,025	0,034	0,128	—	—
	9	0,041	0,029	0,054	0,080	—	—
	10	0,032	0,032	0,041	0,110	—	—
Среднее . .	$\frac{1}{8} \sum_{n=3}^{n=10} \Pi_i$	0,045	0,036	0,0457	0,106	—	—

Последнее обстоятельство объясняется тем, что метод наименьших квадратов дает хорошие решения лишь для нормального и близких к нормальному законов распределения, т. е. для равнозначных по природе систем измерения в нашей модели. Если задавать более обширную область существования законов распределения, то этот метод обработки встречает затруднения. Теоретико-информационная оценка широкого класса законов распределения позволяет внести в этот вопрос еще большую ясность [6].

Рассмотрим рис. 2, на котором под кривой изображена область существования одно- и двумодальных законов распределения. Нормальный закон, находящийся в экстремальной точке 1 кривой, имеет максимальный энтропийный коэффициент K . Это означает наибольшее помехосодержание из всех возможных в природе распределений, так что остальные законы распределения, отличные от нормального, имеют только меньшее значение этого коэффициента, т. е. больший запас полезной информации, чем нормальный закон. В частности, оба закона распределения моделей неравнозначных измерений расположены по левую сторону кривой в районе точки 2, а равномерный закон — в районе точки 3. Таким образом, область законов распределения в среднем обладает меньшими дезинформирующими свойствами по сравнению с нормальным законом. Этим можно объяснить тот факт, что второй алгоритм, использующий равномерные приближения несовместной системы (5),

показал абсолютное повышение точности определения координат для всех моделей, кроме модели нормального закона, в которой оба алгоритма практически равноценны.

Более того, проверка на ЭВМ алгоритмом метода наименьших квадратов третьей и четвертой стратегий природы в условиях полностью известных среднеквадратичных уклонений σ_i (две последние верхние графы табл. 2) дала такое же качество решения,

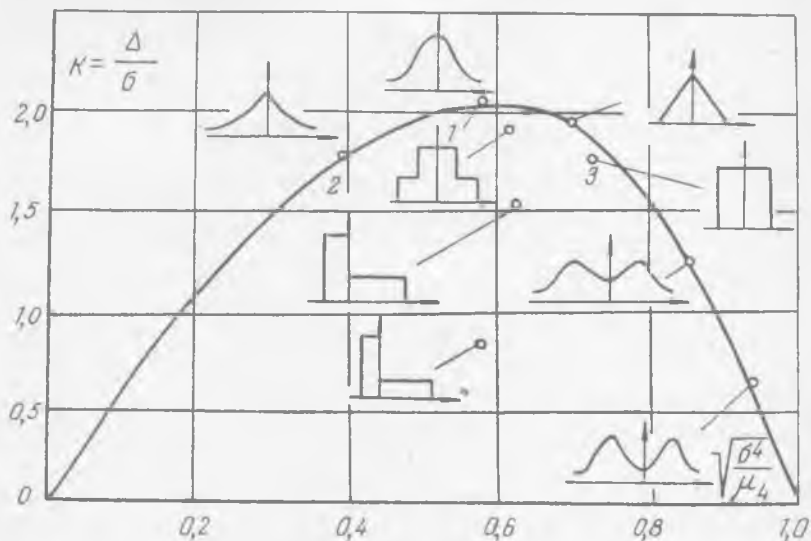


Рис. 2.

как и проверка вторым алгоритмом, но в условиях отсутствия информации о σ_i (две последние нижние графы табл. 2). Это свидетельствует о явных преимуществах второго алгоритма в неравноточных ситуациях и при неполной информации.

Целесообразна дальнейшая разработка статистических алгоритмов для приведенной математической модели триангуляционных измерений, так как она обладает большим «информационным запасом», чем предполагалось ранее, и алгоритмы должны использовать имеющиеся резервы повышения точности. В связи с этим необходимо также «состязание» человека (оператора) и машины. Простым вариантом практического решения последней задачи явится соединение ЭВМ «Наири-2» с устройством отображения визуальной информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щиголев В. М. Математическая обработка наблюдений. М., «Наука», 1969. 320 с.
2. Полевой В. А. Математическая обработка результатов радиогеодезических измерений. М., «Недра», 1971. 344 с.

3. Идельсон Н. И. Способ наименьших квадратов и теория математической обработки наблюдений. М., Геодезиздат, 1947. 359 с.
4. Мудров В. И., Кушко В. Л. Метод наименьших модулей. М., «Знание», 1971. 73 с.
5. Кукес И. С., Старик М. Е. Основы радиопеленгации. М., «Сов. радио», 1966. 640 с.
6. Новицкий П. В. Основы информационной теории измерительных устройств, Л., «Энергия», 1968. 248 с.

АППАРАТНЫЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ АНАЛИЗА СЛОЖНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В. П. Романов, С. С. Терещенко

Возможности живых организмов быстро анализировать и ориентироваться в условиях, когда на вход зрительного анализатора поступает большое количество информации, в значительной степени определяются способностью анализатора поэтапно сжимать информацию на основе ее структурного кодирования и упорядочения. Есть основание считать [1—4], что зрительный анализатор не рассматривает информацию, поступающую на его вход, а логические операции, производимые анализатором, осуществляются не только с самими изображениями, но и с их описаниями. Способ составления описаний сложных изображений зависит от используемого системой зрительного анализатора и, вообще говоря, от неизвестного нам языка описания изображений. Вместе с тем методы перехода от сложного изображения к его описанию в некотором языке, которые должны объяснять процесс формирования описания в зрительном анализаторе, до сих пор выбираются эмпирически. Поэтому, несмотря на повсеместное использование в работах по распознаванию таких понятий как «край», «угол», «отрезок прямой», «выпуклость влево», соответствующие области обнаруживаются на изображении каждым автором по-своему.

Чтобы объяснить способность живого организма быстро анализировать сложные изображения и представить работу зрительного анализатора, необходимо математически моделировать процесс составления описания изображения, синтезировать технические модели процесса распознавания или отдельных его этапов.

Простейшие модели, объясняющие сравнительно несложные операции, производимые за счет латерального взаимодействия на ранних этапах переработки зрительной информации головным мозгом, описаны в работах [1—4].

В ходе изучения сложных функциональных образований [5] исследовались возбуждение различного типа нервных волокон и соответствующие им рецептивные поля. При этом было установлено четыре типа операций, производимых зрительным аппаратом лягушки: выделение кривизны, обнаружение границы, детекторы движущегося или меняющегося контраста, детекторы

затемнения. Хьюбелом и Уиселом [6] были обнаружены анизотропные структуры в головном мозге кошки, специфически реагирующие на отрезки прямой различной ориентации, а также на форму и направление движения объекта в поле зрения. Описаны и другие технические модели, представляющие отдельные этапы работы зрительного анализатора [7—9]. Однако методы синтеза операторов, оптимальным образом реализующих ту или иную функцию обработки отображений, еще не разработаны. Между тем теория статистических решений, методы автоматической группировки позволяют точно поставить и в некоторых случаях решить задачу об оптимальном обнаружении в составе сложного изображения областей с заданными свойствами.

В общем случае при анализе исходного изображения автоматом необходимо решать не только задачу об обнаружении элемента заданной формы, но и об измерении неизвестных параметров.

Пусть $S_1(x, y, \vec{\alpha}, \vec{\beta})$ и $S_2(x, y, \vec{\alpha}, \vec{\beta})$ — две эталонные формы и пусть $\vec{\alpha}$ и $\vec{\beta}$ — векторные параметры, входящие в аналитическое описание изображения. Типичными параметрами могут быть толщина и ориентация штриха, величина и ориентация угла, радиус кривизны; при таком способе задания возникает проблема, что считать различными формами и что одинаковыми, но с разными значениями параметра. Как правило, принимается, что различные формы соответствуют топологическим инвариантам изображений. Хотя различные формы могут зависеть от разных параметров, без

потери общности можно считать, что вектор параметров $\vec{\alpha}$ состоит из одних и тех же компонент, но некоторые компоненты в частных случаях могут быть равны нулю.

Помимо существенных или измеряемых параметров, в эталонное описание могут также входить и несущественные — неиз-

меняемые параметры $\vec{\beta}$. Таким неизменяемым параметром во многих случаях опознавания штриховых изображений является толщина штриха. Отношение правдоподобия оптимального решающего правила Λ_{ij} будет, таким образом, функцией существенных и несущественных параметров. Если $\omega(\vec{\beta})$ — априорное распределение несущественных параметров, то зависимость только от существенных получается усреднением по несущественным параметрам:

$$\Lambda_{ij}(\vec{\alpha}, \vec{\beta}) = \frac{P_i F \left[x/S_i(x, y, \vec{\alpha}, \vec{\beta}) \right]}{P_j F \left[x/S_j(x, y, \vec{\alpha}, \vec{\beta}) \right]}; \quad (1)$$

$$\Lambda_{ij}(\vec{\alpha}) = \int \Lambda_{ij}(\vec{\alpha}, \vec{\beta}) W(\vec{\beta}) d\vec{\beta}. \quad (2)$$

Практически вместо усреднения отношения правдоподобия можно производить усреднение логарифма отношения правдопо-

добия, что, в свою очередь, эквивалентно замене в выражении для логарифма отношения правдоподобия $S_i(x, y, \bar{\alpha}, \bar{\beta})$ на

$$S_i(x, y, \bar{\alpha}, \bar{\alpha}) = \int S_i(x, y, \bar{\alpha}, \bar{\beta}) W(\bar{\beta}) d\bar{\beta}. \quad (3)$$

При группировке и выработке эталонной формы как центра группы усреднение по несущественным параметрам осуществляется автоматически для каждого фрагмента. Следует лишь учитывать «вес» каждой точки, т. е. сколько раз этот фрагмент встречается в выборке.

Различным значениям неизмеряемого параметра соответствуют при этом разные точки в пределах одной и той же группы. Необходимость измерения параметра α требует сохранения вида функциональной зависимости \wedge_{ij} от α . Оптимальный измеритель принимает в качестве результата измерения то значение $\bar{\alpha}$, $\bar{\alpha} = \hat{\alpha}$, для которого

$$\wedge_{ij}(\bar{\alpha}) = \max_{\bar{\alpha}} \wedge_{ij}(\bar{\alpha}); \quad (4)$$

$$\frac{\partial \wedge_{ij}(\bar{\alpha})}{\partial \alpha} = 0 \quad \text{или} \quad \frac{\partial \ln \wedge_{ij}(\bar{\alpha})}{\partial \alpha} = 0. \quad (5)$$

Рассмотрим реализацию поиска экстремума функции $\wedge_{ij}(\bar{\alpha})$ по измеряемому параметру. Функцию можно хранить в автомате лишь в виде дискретного ряда значений. Однако в этом случае необходимо выбрать шаг квантования $\Delta \alpha_k = \frac{\alpha_{2k} - \alpha_{1k}}{N}$, где α_{2k} и α_{1k} — предельные значения параметра α_k ; α_k — k -я компонента вектора $\bar{\alpha}$; N — число отсчетов. От выбора шага зависят точность измерения $\bar{\alpha}$ и объем памяти автомата. Разумный выбор шага квантования имеет важное значение при построении измерителей. Шаг определяется интенсивностью помех и допустимой вероятностью ошибки измерения. Для анализируемого изображения параметр α принимает некоторое значение $\bar{\alpha}^*$. Функция правдоподобия будет зависеть от значения параметра $\bar{\alpha}^*$ неизвестного изображения и от зафиксированного в решающем правиле α_0 , $\wedge_{ij}(\bar{\alpha}^*, \bar{\alpha}_0)$. Чтобы найти экстремум функции \wedge_{ij} , необходимо располагать рядом ее значений. В целях определения того, как

получить ряд значений функции $\wedge_{ij}(\alpha)$ и найти ее экстремум, рассмотрим решающее правило

$$\begin{aligned} \log \wedge_{ij}(\bar{\alpha}^*, \bar{\alpha}_0) &= \int_a^b \int_c^d g(x, y, \bar{\alpha}^*) W_i(x, y, \bar{\alpha}_0) dx dy - \\ &- \int_a^b \int_c^d g(x, y, \bar{\alpha}^*) W_j(x, y, \bar{\alpha}_0) dx dy - \\ &- \frac{1}{2} \int_a^b \int_c^d S_i(x, y, \bar{\alpha}_0) W_i(x, y, \bar{\alpha}_0) dx dy + \\ &+ \frac{1}{2} \int_a^b \int_c^d S_j(x, y, \bar{\alpha}_0) W_j(x, y, \bar{\alpha}_0) dx dy. \end{aligned} \quad (6)$$

В качестве оценки $\bar{\alpha}$ значений $\bar{\alpha}^*$ используем значения параметров, полученные как решение системы уравнений

$$\frac{\partial \ln \wedge_{ij}(\bar{\alpha})}{\partial \alpha_k} = 0, \quad (7)$$

где $\bar{\alpha} = \bar{\alpha}^* - \bar{\alpha}_0$; $k = 1, 2, \dots, q$.

Дифференцируя (6), получаем

$$\begin{aligned} \frac{\partial \ln \wedge_{ij}(\bar{\alpha})}{\partial \alpha_k} &= \int_a^b \int_c^d g(x, y, \bar{\alpha} + \bar{\alpha}_0) \frac{\partial W_i(x, y, \bar{\alpha} - \bar{\alpha}^*)}{\partial \alpha_k} dx dy - \\ &- \frac{1}{2} \int_a^b \int_c^d g(x, y, \bar{\alpha} + \bar{\alpha}_0) \frac{\partial W_j(x, y, \bar{\alpha} - \bar{\alpha}^*)}{\partial \alpha_k} dx dy - \\ &- \frac{1}{2} \int_a^b \int_c^d \frac{\partial S_i(x, y, \bar{\alpha} - \bar{\alpha}^*)}{\partial \alpha_k} W_i(x, y, \bar{\alpha} - \bar{\alpha}^*) dx dy + \\ &+ \frac{1}{2} \int_a^b \int_c^d \frac{\partial S_j(x, y, \bar{\alpha} - \bar{\alpha}^*)}{\partial \alpha_k} W_j(x, y, \bar{\alpha} - \bar{\alpha}^*) dx dy, \end{aligned} \quad (8)$$

где $k = 1, 2, \dots, q$; $i, j = 1, 2, \dots, N$.

Учитываем, что

$$\int_a^b \int_c^d R(x - \xi, y - \eta) W_i(\xi, \eta) d\xi, d\eta = S_i(x, y);$$

$$\int_a^b \int_c^d \frac{\partial S_i(x, y, \vec{\alpha} - \vec{\alpha}^*)}{\partial \alpha_k} W_i(x, y, \vec{\alpha} - \vec{\alpha}^*) dx dy =$$

$$= \int_a^b \int_c^d S_i(x, y, \vec{\alpha} - \vec{\alpha}^*) \frac{\partial W_i(x, y, \vec{\alpha} - \vec{\alpha}^*)}{\partial \alpha_k} dx dy.$$

Следовательно,

$$\frac{\partial \ln \wedge_{i_j}(\vec{\alpha})}{\partial \alpha_k} = \int_a^b \int_c^d g(x, y, \vec{\alpha} + \vec{\alpha}_0) \frac{\partial W_i(x, y, \vec{\alpha} - \vec{\alpha}^*)}{\partial \alpha_k} dx dy -$$

$$- \int_a^b \int_c^d g(x, y, \vec{\alpha} + \vec{\alpha}_0) \frac{\partial W_j(x, y, \vec{\alpha} - \vec{\alpha}^*)}{\partial \alpha_k} dx dy -$$

$$- \int_a^b \int_c^d S_i(x, y, \vec{\alpha} - \vec{\alpha}^*) \frac{\partial W_i(x, y, \vec{\alpha} - \vec{\alpha}^*)}{\partial \alpha_k} dx dy +$$

$$+ \frac{1}{2} \int_a^b \int_c^d S_j(x, y, \vec{\alpha} - \vec{\alpha}^*) \frac{\partial W_j(x, y, \vec{\alpha} - \vec{\alpha}^*)}{\partial \alpha_k} dx dy, \quad (9)$$

где $k = 1, 2, \dots, q$; $i, j = 1, 2, \dots, N$.

Таким образом, неизвестное изображение должно обрабатываться производной весовой функцией по параметру $\vec{\alpha}$. Чтобы найти решение системы полученных уравнений, надо учесть, что функция W_i и ее производная зависят уже от трех переменных $x, y, \vec{\alpha}$. Если $W(x, y)$ можно хранить в виде пространственного распределения весов анизотропных пространственных фильтров, то $W(\vec{\alpha})$ сохраняется только для дискретных значений $\vec{\alpha}$. Решающее правило (9) определяет общий принцип измерения параметра.

Оценим шаг квантования. Для упрощения выражений рассмотрим задачу об измерении отдельно от задачи об опознавании. Станем, например, считать, что задача об опознавании уже решена для данного структурного элемента и необходимо лишь оценить значение неизвестного скалярного параметра. Пусть шаг квантования измеряемого параметра $\Delta\alpha$ выбран. Рассмотрим, от чего зависит вероятность ошибки $P_{\vec{\alpha}}$, если значение $\vec{\alpha} + \Delta\alpha$ принять

за $\vec{\alpha}$.

В связи с этим заметим, что выходной сигнал оптимального измерителя, полученный линейным (вырожденным) преобразованием двумерного случайного процесса, в соответствии с (9) также представляет собой нормальный случай процесса (а при фиксиро-

роvanном α — случайную величину) со средним значением при условии $g(x, y, \bar{\alpha}) = S_i(x, y, \bar{\alpha}^*)$, определенным из второй формы решающего правила в виде

$$E \{ \log \wedge_{ij}(\bar{\alpha}^*, \bar{\alpha}_0) \} = \int_a^b \int_c^d S_i(x, y, \bar{\alpha}^*) W_{ij}(x, y, \bar{\alpha}_0) dx dy - \\ - \frac{1}{2} \int_a^b \int_c^d S_i(x, y, \bar{\alpha}_0) W_{ij}(x, y, \bar{\alpha}_0) dx dy - \\ - \frac{1}{2} \int_a^b \int_c^d S_j(x, y, \bar{\alpha}_0) W_{ij}(x, y, \bar{\alpha}_0) dx dy.$$

При $\bar{\alpha}^* = \bar{\alpha}_0$

$$E \{ \log \wedge_{ij}(\bar{\alpha}) \} = \frac{1}{2} \left[\int_a^b \int_c^d S_i(x, y, \bar{\alpha}_0) W_{ij}(x, y, \bar{\alpha}_0) - \right. \\ \left. - \int_a^b \int_c^d S_j(x, y, \bar{\alpha}_0) W_{ij}(x, y, \bar{\alpha}_0) \right] dx dy = \\ = \frac{1}{2} \int_a^b \int_c^d [S_i(x, y, \bar{\alpha}_0) - S_j(x, y, \bar{\alpha}_0)] W_{ij}(x, y, \bar{\alpha}_0) dx dy = \\ = \frac{1}{2} \int_a^b \int_c^d \int_{a'}^{b'} \int_{c'}^{d'} [S_i(x, y, \bar{\alpha}_0) - S_j(x, y, \bar{\alpha}_0)] r(x - \xi, y - \eta) [S_i(\xi, \eta) - \\ - S_j(\xi, \eta)] d\xi d\eta dx dy. \quad (10)$$

Обозначим

$$E \{ \wedge_{ij}(\bar{\alpha}) \} = \mu_{\Delta} = \frac{1}{2} \gamma(\bar{\alpha}). \quad (11)$$

Корреляционная функция выходного процесса оптимального измерителя

$$E \{ \wedge_{ij}(\bar{\alpha}^*) - \mu_{\Delta}(\bar{\alpha}^*)_{ij}(\bar{\alpha}_0) - \mu_{\Delta}(\bar{\alpha}_0) \} = \\ = \int_a^b \int_c^d \int_{a'}^{b'} \int_{c'}^{d'} [S_i(x, y, \bar{\alpha}^*) - S_j(x, y, \bar{\alpha}^*) r(x - \xi, y - \eta) \times \\ \times [S_i(\xi, \eta, \bar{\alpha}_0) - S_j(\xi, \eta, \bar{\alpha}_0)]] d\xi d\eta dx dy. \quad (12)$$

При $\bar{\alpha}^* = \bar{\alpha}_0$ получим дисперсию случайной величины — выходной реакции оптимального измерителя, равную $\sigma_{\Delta}^2 = \gamma(\bar{\alpha})$. Тогда вероятность ошибки для нормальной случайной величины

выходной реакции измерителя можно определить как интеграл вероятности

$$P_{\alpha} = \Phi \left(\frac{\sqrt{\gamma(\bar{\alpha})}}{2} \right), \quad (13)$$

где

$$\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx.$$

Следовательно, вероятность ошибки, принимаемая за α , если известна сумма $\alpha + \Delta\alpha$, целиком определяется выражением для сигнальной функции (12). В свою очередь, если положить $S_j(x, y, \alpha^*) = S_i(x, y, \alpha^* + \Delta\alpha)$, то вероятность ошибки будет зависеть от скорости убывания степени совпадения с особой эталонной формой при изменении параметра и от корреляционной функции шума.

Так как $P_{\alpha} = \Phi \left(\frac{\sqrt{\gamma(\bar{\alpha})}}{2} \right)$, при подходящей нормировке имеет место соотношение $\gamma(\bar{\alpha}) = 2 [1 - \psi(\bar{\alpha})]$. Тогда

$$P_{\alpha} = \Phi \left[\sqrt{1 - \psi(\bar{\alpha})} \right].$$

Таким образом, совокупность значений функции $\log(\bar{\alpha})$ для разных значений α можно получить за счет дискретизации α и использования многих каналов одновременной параллельной обработки изображения. Измерение параметра α фактически согласно выражениям (12)—(13) соответствует нахождению точки экстремума сигнальной функции. Поэтому потенциальная точность оценки параметра зависит от ширины сигнальной функции и оказывается тем выше, чем «уже» функция неопределенности вблизи экстремума. Шумы и коррелированность сигналов с различными значениями параметра уменьшают предельную точность измерения (разрешения) параметра.

Для «белого» шума с корреляционной функцией

$$\frac{2}{N_0} \delta(x - \xi, y - \eta)$$

вероятность ошибки описывается уравнением

$$\gamma_{б.ш}(\bar{\alpha}) = \int_a^b \int_c^d [S_i(x, y, \bar{\alpha}) - S_i(x, y, \bar{\alpha} + \Delta\alpha)]^2 dx dy. \quad (14)$$

При соответствующей нормировке (так, чтобы $\iint S_i^2(x, y, \alpha) dx dy = 1$) последнее выражение целиком будет определяться нормированной функцией неопределенности эталонной формы

$$\psi(\alpha, \varphi) = \frac{\int_a^b \int_c^d S_i(x, y, \vec{\alpha}) S_i(x, y, \vec{\alpha} + \varphi) dx dy}{\sqrt{\int_a^b \int_c^d S_i^2(x, y, \vec{\alpha}) dx dy \int_a^b \int_c^d S_i^2(x, y, \vec{\alpha} + \varphi) dx dy}}. \quad (15)$$

Таким образом, расчет точности при заданной вероятности ошибки измерения заключается в построении функции неопределенности, корреляционной функции и нахождении по ним шага квантования параметра α , обеспечивающего заданную вероятность ошибки.

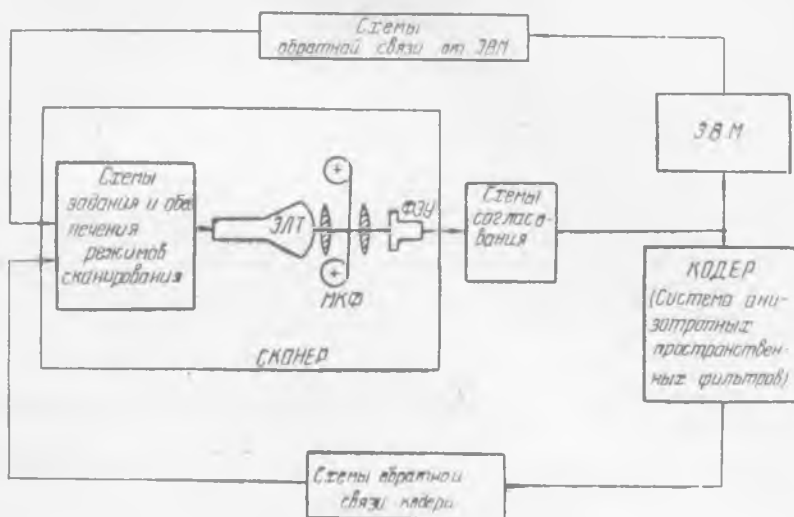
Классификация и измерение параметров структурных элементов в автомате производятся Е-системой [8], связанной со сдвиговым регистром кодера, хранящим часть изображения в окне 32×32 точки, и системой коррелометров-сумматоров, весовые коэффициенты в которых задаются посредством проводимостей резисторов. Каждый структурный элемент при соотношениях размера изображения, шага развертки и толщины штрихов, используемых в устройстве, анализируется в окне 7×7 элементов раstra. В этом случае общее число весов (резисторов) составляет $H = Nlh$, где N — число эталонных форм; l, h — размеры окна в клеточках. При значительном количестве эталонных форм или большом числе измеряемых параметров и малом шаге квантования для каждого из параметров общий объем оборудования увеличивается довольно быстро. Если общее число детекторов равно N , то объем памяти устройства, необходимого для записи всех весов $W_i(x, y, \alpha)$ или $\frac{\partial W_i(x, y, \alpha)}{\partial \alpha}$, пропорционален произведению N на число отсчетов,

которые берутся по каждой из переменных x, y, α в целях представления функции W .

Описанные процедуры достаточно сложно реализуются на ЭВМ, особенно двумерная обработка графических изображений. Поэтому были разработаны специальные моделирующие устройства и схемы.

В общем случае оптимальный измеритель, моделирующий отдельные этапы работы зрительного анализатора, должен состоять из считывающего устройства (сканера) и кодера; основными задачами данных устройств являются поиск и обнаружение отдельных компонент изображения на физическом носителе, классификация отдельных компонент и измерение параметров компонент изображения.

Сканер формирует последовательность отсчетов об изображении и передает их в кодер. На вход кодера практически невозможно передать $S(x, y, a)$ без искажений, так как сканер сам является источником шумов.



На рисунке представлена схема включения сканера и кодера. В отдельных случаях сканер через блок согласования может быть подключен непосредственно к ЭВМ. От кодера или ЭВМ к сканеру через схемы обратной связи осуществляется управление считыванием изображения после некоторых этапов анализа изображения, зафиксированного на микрофильме (МКФ): воздействие от схем обратной связи передается через схемы задания и обеспечения режимов сканирования на считывающий узел сканера — электронно-лучевую трубку (ЭЛТ): в качестве светоприемника в фотоэлектрическом узле преобразования на ЭЛТ используется фотоэлектронный умножитель (ФЭУ). Сканер может обнаруживать изображение, измерять некоторые параметры.

Эксперименты доказали сложность двумерной электронно-оптической обработки изображений сканером. Основными погрешностями, возникающими из-за различных электронно-оптических и геометрических искажений в узлах считывающей трубки, оптической системы и фотопреобразователя, являются дисторсия, возникающая по краям растрового поля ЭЛТ, флуктуации яркости и формы считывающего пятна, временные флуктуации фотопреобразователя и разброс характеристик кодера.

Значительное уменьшение указанных выше аберраций может быть достигнуто путем использования схем динамической подфо-

кусировки и исправления астигматизма электронно-оптической системы ЭЛТ, а также введением обратной связи по яркости.

Сканер и кодер благодаря своим функциональным возможностям позволяют моделировать широкий класс алгоритмов обработки сложных изображений. Предлагаемая математическая модель обеспечивает синтезирование оптимального оператора, реализующего заданную функцию обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шмитт О. Биологические преобразователи и кодирование. Сб. «Современные проблемы биофизики», вып. 2. М., ИЛ, 1961, с. 233—247.
2. Хартлайн Х. Рецепторные механизмы и интеграция сенсорной информации в сетчатке глаза. Там же, с. 266—272.
3. Ратлифф Ф. Тормозное взаимодействие в элементах сетчатки. Сб. «Теория связи в сенсорных системах». М., «Мир», 1964, с. 338—354.
4. Юнг Р. Интеграция в нейронах зрительной коры и ее значение для зрительной информации. Там же, с. 375—415.
5. Lettwin J. V. What the frog's eye tells the frog's brain. «Proc. IRE», 47, 11 (1959), p. 1940—1952.
6. Hubel D. H., Wiesel T. N. Receptive fields of single neurones in cat's striate cortex. «J. Physiology», 154, 12 (1960), p. 572—580.
7. Романов В. П. Преобразование изображений в одной модели непрерывной нейронной сети. «НТИ», 1963, № 2, с. 36—41.
8. Романов В. П. Применение двумерной фильтрации изображений для повышения надежности автоматического чтения. «НТИ», 1964, № 7, с. 24—29.
9. Цуккерман И. И. Преобразования электронных изображений. Л., «Энергия», 1972. 184 с.

ОБ ОДНОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И АЛГОРИТМЕ ОСМОТРА СЛОЖНЫХ ГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

С. С. Терещенко, В. П. Романов

У большинства современных автоматов, преобразующих графическую информацию в код, имеются фиксированные алгоритмы работы, которые не зависят от свойств обрабатываемых изображений.

Между тем исследования движений глазного яблока при рассмотрении сложных изображений показывают, что в биологических системах способ осмотра (сканирования) изображения зависит от свойств рассматриваемого изображения. По-видимому, при этом имеют место «оценка» информативности изображения, сосредоточение внимания на более информативных участках, выделение «точек фиксации» в ходе рассматривания [1, 2]. Это важно учитывать с точки зрения объема кодов, поступающих на вход ЭВМ, при организации работы считывающих и кодирующих автоматов.

В данной работе описываются модель и алгоритм, в которых учтены некоторые особенности работы зрительного анализатора. Отличие данного алгоритма от других состоит в том, что процесс осмотра изображения не отрывается от анализа; наоборот, анализ определяет порядок обхода и частично — способ кодирования сложного изображения. Такая организация работы сканера и кодера обеспечивает более высокую эффективность при заданной точности кодирования и меньшей избыточности.

От алгоритмов обычных следящих разверток данный алгоритм отличается тем, что позволяет осматривать и кодировать сложные и разветвленные изображения. Кроме того, разработанный алгоритм является в некоторой степени адаптивным по отношению к обрабатываемому изображению.

Общая организация работы сканера и кодера по данному алгоритму становится очевидной из рис. 1. Многие существующие автоматы не имеют цепи обратной связи (на рис. 1 она отмечена знаком \oplus).



Рис. 1.

Разработанный алгоритм реализовался на модели устройства УСМ-1000, созданного в ВИНТИ АН СССР. Основные блоки и параметры устройства следующие: микрофильм, снятый на 35-миллиметровой пленке (кассета длиной 60 м), покадрово перемещается лентопротяжным механизмом в стартстопном режиме, точность установки кадра — 30 мк. В телевизионном датчике используется ЭЛТ типа 13ЛК12Л, размер сканирующего пятна — 20—25 мк по всему полю 48 × 72 мм. Оптическая система содержит восьмимиллиметровый объектив, проецирующий растр ЭЛТ на микрофильм с уменьшением в 2 раза. Три светоделительные

призмы-куба световой поток расщепляет на 4 канала (основной, обратной связи по яркости, координаты X и Y измеряются посредством реперных решеток): $f = 100$ мм; $d_j = 1 : 4$; разрешающая способность по полю — 60—100 линий/мм при контрасте 60%; падение освещенности на краях растра — 10%. В качестве светоприемника используется ФЭУ-53 с интегральной чувствительностью в спектре светового луча ЭЛТ 750—900 а/лм. Процесс считывания и формирования видеосигналов контролируется видеоконтрольным устройством (40 × 64 точки растра).

Рассмотрим взаимодействие сканера и кодера на примере организации их совместной работы по разработанному адаптивному алгоритму считывания и обработки графических данных с переменным рецептивным полем (ПРП). Под рецептивным полем понимается микрорастр на экране ЭЛТ размером 1/30—1/3000 от прогрессивного нормального растра (1024 × 1024, 2048 × 2048 точек).

Особенностью данного алгоритма, использующего при «осмотре» изображения переменное рецептивное поле (ПРП), является обеспечение развитой обратной связи от кодера (анизотропных пространственных фильтров и системы анизотропных пространственных фильтров).

Считывание сетчаткой рецепторов и параллельная обработка без введения последовательных способов обработки изображений приводят к увеличению объема аппаратуры и к возрастанию логической сложности обработки видеосигналов. Поэтому в сканере реализовано считывание переменным рецептивным полем (ПРП) [3].

Сканер по данному алгоритму может работать в режиме телевизионного считывания прогрессивным нормальным растром — 1024 × 1024 точки, в режиме поискового растра — 1 × 1024 точки, растров 3 × 3, 9 × 9 и 21 × 21 точек. Последние три растра используются при автоматическом и полуавтоматическом прослеживании различных графических изображений. Сканер и кодер по данному алгоритму обеспечивают прослеживание отдельных частей изображения, измерение некоторых параметров, запоминание координат пройденных точек и узлов. Узлы пересечения анализируются схемой выбора направления и приоритета, что делает возможным считывание и кодирование сложных изображений.

На рис. 2 приведена блок-схема адаптивного алгоритма. От маркерной отметки, расположенной в служебной зоне микрофильмированного документа, начинается движение сканирующей апертуры (размер — 20 мк) по координате X . При прохождении всего поля микрофильмированного документа по координате X апертура возвращается в служебную зону маркера, одновременно перемещаясь по X . Так реализуется оператор $P1$ организации поискового растра. При попадании в поле зрения апертуры «черного» на кадре микрофильма подсчитывается количество видеопульсов в «счетчике черного» (оператор $A1$), после чего

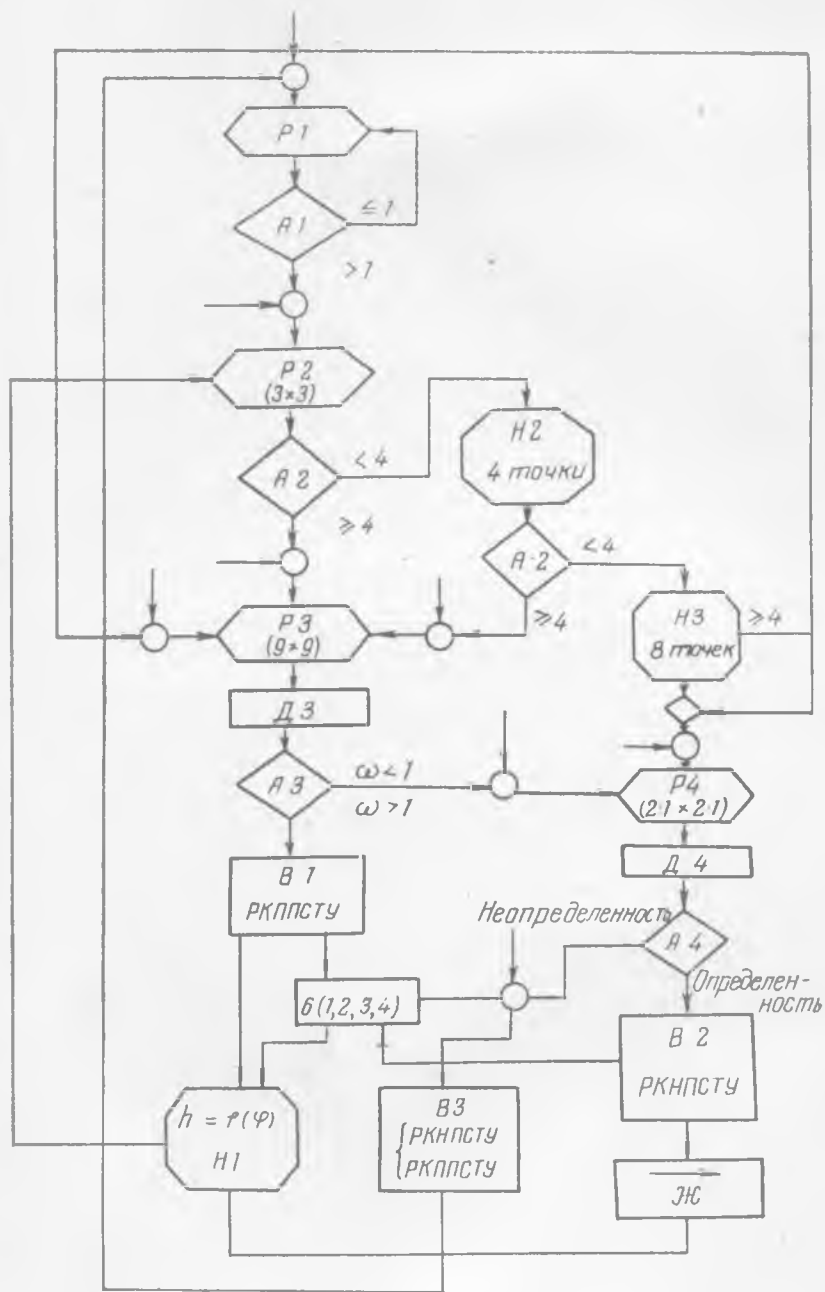


Рис. 2.

управление передается схемам организации строчно-локального растра и формируется растр 3×3 точек (оператор P2). В «счетчике черного» опять подсчитывается количество видеоимпульсов (оператор A2). Если количество видеоимпульсов больше или равно четырем, то управление передается оператору P3, с помощью которого формируется растр 9×9 точек. При наличии в R -окрестности «черного», попавшего в окно 9×9 элементов разложения, видеоимпульсы поступают в динамический регистр кодера (оператор D3). На основе данной информации R' -окрестность кодируется восьмиразрядным кодом как существенная точка изображения, которая может быть отрезком прямой или кривой и с определенной ориентацией. Кодированием существенной точки (элемента изображения) заканчивается анализ «черного» в анизотропных пространственных фильтрах кодера (оператор A3). Код и координата существенной точки заносятся и хранятся в регистре координат полностью пройденных существенных точек и узлов РКППСТУ (оператор B1). Далее посредством оператора H1 производится экстраполяция с выбором следующего шага h по табличному φ^* :

$h = f(\varphi^*)$, $\varphi^* = \varphi_1 - \varphi_2$; здесь φ_1 и φ_2 — измеряемые параметры при двух предыдущих шагах.

В процессе реализации оператора A2 может оказаться, что количество видеоимпульсов меньше четырех. В этом случае управление передается оператору H2, осуществляющему перемещение ПРП (растр 3×3) перпендикулярно к основному направлению на четыре элемента разложения. При этом «черное» анализируется оператором A2 в «счетчике черного». Если количество видеоимпульсов больше или равно четырем, то управление передается оператору P3; в случае меньшего количества видеоимпульсов ПРП (растр 3×3) перемещается на восемь элементов разложения перпендикулярно к основному направлению оператор H3). После этого производится анализ «черного» в «счетчике черного» и управление в случае неопределенности (меньше четырех видеоимпульсов) передается оператору P4, формирующему растр 21×21 точек. При наличии «черного» в R'' -окрестности видеоимпульсы с помощью оператора D4 передаются в динамический регистр кодера, где информация анализируется системой анизотропных пространственных фильтров, предназначенных в данном случае для кодирования существенных узлов (углов, пересечений линий). Если неопределенность остается после реализации операторов P4, D4, A4, то осуществляется обращение к регистру координат неполностью пройденных существенных точек и узлов.

Особенностью данного алгоритма является возможность схемного выбора направления и блокировка последнего, что позволяет определять направление следующего шага в узлах пересечения. В результате совместной работы сканера и кодера по данному алгоритму можно выделять «центр» линии, изменять длину и толщину отрезков, углы наклона, а при некоторых схем-

ных усложнениях — площадь фигур. Операторы P1—P4, A1—A4, D3, D4, промоделированы в схемном варианте, а операторы B1—B3, H1, H2, Б, Ж на ЭВМ «Минск-22».

В ходе моделирования выявлены следующие недостатки данного алгоритма: критичность размера ПРП (3×3), (9×9) и толщины линий изображения в отношении надежности прослеживания и кодирования данных линий; надежная работа автомата в узлах с большим числом пересекающихся линий с углами менее 22°30'; значительное количество электронной аппаратуры.

Положительными сторонами данного алгоритма являются моделирование отдельных этапов работы зрительного анализатора при обработке различных видов графической информации; большой набор параметров, получаемых со считываемого и кодируемого изображений; возможность работы с линиями, имеющими разрывы и пересекающимися предварительное уменьшение объема информации, поступающего при вводе изображения в ЭВМ; автоматический и полуавтоматический режимы работы с вмешательством оператора в процессе считывания и кодирования; обратная связь от ЭВМ через сканер и кодер к микрофильмированному изображению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романов В. П. Преобразование изображений в одной модели непрерывной нейронной сети. «НТИ», 1963, № 2, с. 36—41.
2. Романов В. П. Применение двумерной фильтрации изображений для повышения надежности автоматического чтения. «НТИ», 1964, № 7, с. 24—29.
3. Цуккерман И. И. Преобразование электронных изображений. Л., «Энергия», 1972, с. 184.

К ВОПРОСУ ОБ АКСИОМАТИЧЕСКОМ ПОСТРОЕНИИ ТЕОРИИ МЫШЛЕНИЯ

В. Н. Чудаков

Предпосылки создания общей теории мышления

В настоящее время существуют три основных направления в изучении процессов и структур мышления: 1) выяснение физических основ мышления; 2) логико-алгебраический анализ формирующихся психологических структур; 3) математическое описание нейронных структур, обуславливающих {мыслительный процесс. В основе этих направлений лежат три фундаментальные теории о процессах и структурах мышления на нейронном и психологическом уровнях.

Первая теория, разработанная Н. И. Кобозевым, посвящена термодинамике процессов информации и мышления. Процесс информации может быть промоделирован на основе образа идеального газа, состоящего из одинаковых неизменяющихся «частиц-шансов», которые не претерпевают никаких других процессов,

кроме перевода из первоначально заполняемых ими k ячеек в какую-то одну с затратой работы информации. Эта модель позволяет термодинамически вывести уравнение Шеннона—Винера $H_{\text{Шенн}} = I_{\text{Вин}}$. Соотношение между энтропией информации и количеством последней термодинамически подобно соотношению между энтропией идеального газа и совершенной над ним работой. Работа информации выражает функцию Винера — количество информации. Отсюда вытекает, что процесс информации находится в области общей термодинамики с постоянным и неизменным сортом частиц, распределенных между k изолированными (в случае прединформации) или сообщающимися между собой ячейками (в случае предельно выраженной информации).

Осуществление процесса информации на молекулярном уровне допустимо и не требует условий, физически не выполнимых для молекулярных систем. Процесс мышления моделируется на основании химической термодинамики в виде самопроизвольного перехода ($z - 1$) сортов шансов, сосредоточенных в одной ячейке, в некоторый k -й сорт с падением свободной энергии и энтропии и выражается определенными термодинамическими уравнениями мышления. Работа суждения (решения)

$$L = \sum_{i=1}^z p_i \log p_i + \Delta\varphi^0 = I_{\text{Вин}} + \Delta\varphi^0 > 0;$$

энтропия суждения (решения)

$$G = \sum_{i=1}^z p_i \log p_i + \Delta H^0 = H_{\text{Шенн}} + \Delta H^0 > 0.$$

Информация термодинамически выводится из мышления как его более частная и более простая энтропийная форма, способная осуществляться молекулярными механизмами; обратное не имеет места. Термодинамическими условиями того, что мыслительный процесс является информационным, будут $\Delta\varphi^0 = 0$, $\Delta H^0 = 0$ и соответственно $L < 0$. В результате уравнения мышления переходят в уравнения информации как в свой частный случай:

работа информации $I = \sum_{i=1}^z p_i \log p_i < 0$; энтропия информации

$H_{\text{Шенн}} = - \sum_{i=1}^z p_i \log p_i > 0$. Условием логического однозначного

мышления являются предельный переход к термодинамическим условиям $T = 0$, $H_{\text{мол.к}} = 0$, что отвечает полному освобождению мышления от молекулярной статистики; на молекулярном уровне без подвода антиэнтропии эти условия невозможны. В этом заключается так называемый термодинамический парадокс мышления. Процесс мышления подвержен статистике на молекулярном и системном уровнях. Чтобы разрешить это противоречие, Н. И. Кобозев ввел гипотезу об антиэнтропийном механизме, который дает возможность осуществлять процесс логического мышления физико-химической системой мозга [1, 2].

В теории У. Мак-Каллока и У. Питтса устанавливается изоморфизм нервных сетей и логики предложений. Можно сказать, что не существует различия между возможностью словесного, полного и однозначного описания действительного или воображаемого способа поведения и возможностью реализации этого способа поведения посредством конечной нервной сети. Более общие свойства нейронных сетей (структур) описываются при помощи современной алгебры [3, 4].

В операциональной теории интеллекта Ж. Пиаже сформулирован ряд важнейших положений, отразивших специфический подход к анализу структур мышления и составивших одну из решающих основ операциональной концепции интеллекта. Сущность операциональной концепции интеллекта заключается в понимании интеллекта как системы скоординированных между собой и обратимых операций, в установлении интериоризированных мыслительных операций от внешних предметов действий и в определении последовательных стадий (уровней) формирования интеллекта, т. е. стадий становления все усложняющихся операциональных систем. Ж. Пиаже сосредоточил внимание на эволюции интеллекта в раннем детском возрасте, вплоть до формирования курсивного логического мышления. Различные операциональные уровни формирующегося мышления соответствуют в пределе следующим фундаментальным математическим структурам:

1) структуре порядка, задаваемой схемой $S = \langle A, \beta(A \times A) \rangle$ (A — произвольное множество; $\beta(A \times A) \in A \times A$ — отношение, заданное на A) и ответственной за упорядочение продукции мышления и анализ возможного и действительного;

2) алгебраической структуре, задаваемой схемой $F = \langle A, \beta((A \times A) \times A) \rangle$, где $\beta((A \times A) \times A)$ — операция на A) и выражающей идею операции;

3) топологической структуре, задаваемой схемой $V = \langle A, \beta(\beta(A)) \rangle$ и непосредственно связанной с интуитивными понятиями непрерывности, окрестности, предела [5, 6].

На основании экспериментов Ж. Пиаже выделил два уровня сформировавшихся структур мышления [6—8]:

а) конкретный, удовлетворяющий аксиомам группировки — композиции, инверсии, идентичности, тавтологии, ассоциативности, на основании которых строятся структуры классификации, порядка и соответствия;

б) формальный, удовлетворяющий четырем аксиомам операции преобразования (I, N, R, C), образующим групповую структуру. Ни одна из конкретных структур мышления невозможна без логико-математической координации, которая в общем виде выражает структуру реальности. Овладение логико-математической координацией (отношениями между любыми объектами в «чистом виде») возможно только через воздействие субъекта на объекты. Однако изучить эту деятельность можно только посредством анализа формирующихся психологических структур мышления [5].

Аксиоматика физико-математической теории мышления

Систематизируя и обобщая основные направления в исследовании мышления, попытаемся сформулировать основные аксиомы физико-математической теории мышления.

Аксиома 1 характеризует свойство структурности мышления. Единицей анализа мышления является структура $U = \langle A, \Omega_f, \Omega_p, C \rangle$. Понятие и определение структуры будут даны ниже. Пусть M — множество нейронных структур, которым соответствует множество психических структур мышления N . Тогда все функциональные свойства мыслительной системы реализуются на нейронном и психическом уровнях структурами, принадлежащими множеству M (соответственно — множеству N). Любая структура мышления характеризуется параметрами целостности (α), трансформации (β) и саморегуляции (γ).

Аксиома 2 характеризует свойство связности возникающих операций мышления. Пусть имеется множество операций мышления T . Тогда операции не могут возникать изолированно, а лишь в совокупности, образуя структуры операций.

Аксиома 2 легко проверяется экспериментально [5, 6].

Аксиома 3 характеризует изоморфизм комбинаций функциональных связей нейронов логико-алгебраическим структурам [3, 10, 11].

Аксиома 4 характеризует актуализацию потенциальных возможностей нервной системы. Созревание нервной системы открывает ряд возможностей, несозревание — ряд невозможностей. Данные возможности не актуализируются до тех пор, пока условия материального и мысленного опыта не приведут к этой актуализации [8, 11].

Аксиома 5 характеризует взаимоотношения между структурами мышления и математическими структурами. Там, где отношения между различными структурами (нейронными, психологическими и т. д.) имеют дедуктивную форму и форму приложения математической модели к экспериментальным данным, можно говорить о наличии отношений изоморфизма или просто соответствия. Различные математические структуры позволяют осуществлять и анализировать всевозможные изоморфные отображения между разными конкретными структурами мышления. Более конкретные изоморфизмы установлены У. Мак-Каллоком и У. Питтсом между нейронными структурами (сетями) и структурами математической логики [3], Ж. Пиаже — между операциональными структурами мышления и логико-алгебраическими [5—9], В. Леви — между структурами мозга и топологическими структурами [11], Э. Зиманом — между структурами мозга и структурами отношений [12], Л. Б. Интельсоном — между информационными структурами психической деятельности и структурами объективной действительности [13].

Если отношение выражается в использовании одной группы явлений (событий) для объяснения или «сведения» другой их группы, то оно называется отношением взаимозависимости. Аналогично отношения взаимозависимости могут появляться между различными группами структур [8]. Например, некоторые исследователи, пытаясь объяснить память, в процессе любого обучения опираются на предварительные физико-химические структуры, связанные с нейронными отношениями взаимозависимости. Нейронные структуры можно объяснить посредством явлений, которые имеют место в физико-химических структурах. Операциональные (психические) структуры мышления обусловлены нейронными в том же смысле, что и нейронные — физико-химическими. Это отношение взаимозависимости можно представить и в генетическом плане, т. е. позволительно утверждать, что в конечном счете мыслительная деятельность обуславливается рефлексамии новорожденного [5].

Аксиома 6 характеризует свойство предельности структур мышления. Пусть M — множество нейронных структур мышления; N — множество психических структур мышления; Q — множество математических структур. Между N и M существует отношение изоморфизма φ . Тогда $M \xrightarrow{\varphi} N \Rightarrow Q$. Нейропсихические структуры в пределе являются математическими [10].

Аксиома 7. Формирующееся мышление проходит ряд стадий. Стадия характеризуется аксиомами, на основании которых строятся структуры, присущие данной стадии [5, 7].

Аксиома 8 характеризует экстремальное свойство стадий формирующегося мышления. Пусть имеется структура $U = \langle A, \Omega_f, \Omega_p, C \rangle$. Возьмем множество всех подмножеств H основного множества A . Любое подмножество $A_i \in H$ образует подструктуру $U_i = \langle A_i, \Omega_{f_i}, \Omega_{p_i}, C_i \rangle$. Образует подмножество структур $\{U_i\}_i^\infty$, тогда экстремальное свойство выражает

$$\min\{U_i\}_i^\infty \quad (1)$$

или $\min\{A_i\}, \min\{\Omega_{f_i}\}, \min\{\Omega_{p_i}\}, \min\{C_i\}$.

Выражение (1) характеризует стадию формирующегося мышления. Структуры фиксированного уровня находятся в состоянии равновесия и устойчивости.

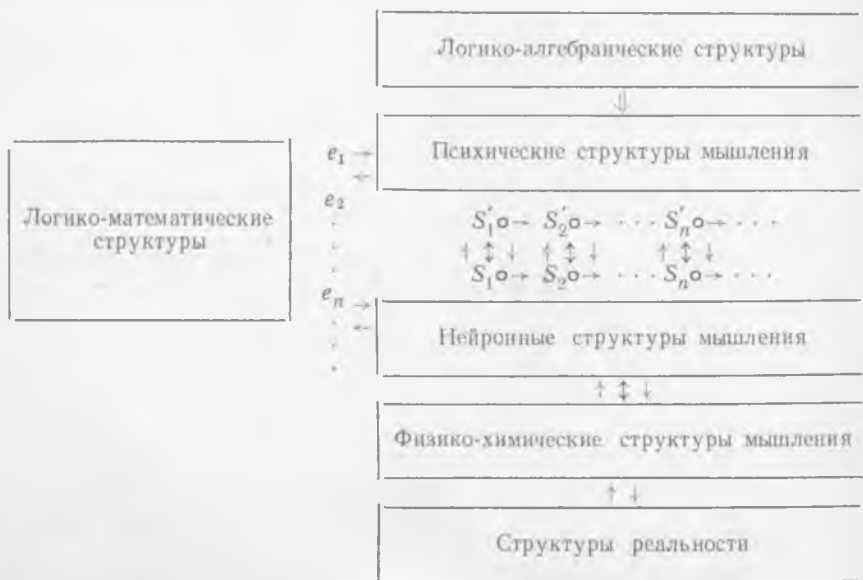
Аксиома 9 характеризует свойство имплицитивности состояний психических структур мышления N . Пусть $X_i \in N$ и пусть X_i имеют множество состояний T . Тогда любая пара $y, z \in T$ связана отношением импликации $y \rightarrow z$. Состояние сознания y предполагает состояние z , но не является причинным, как в случае состояний нейронных структур. Состояния сознания причинно обусловлены нейронными состояниями мозга. Существует два типа связей между состояниями сознания: логическая импликация и импликация значений эффективного характера. Они порожд-

дены нервной системой, которая причинно порождает их материальный субстрат [8].

Аксиома 10 характеризует безэнтропийность процесса дискурсивного мышления $H_{k(\text{мол})} = 0$ при $T > 0$. Физически процесс логического мышления безэнтропиен и является исключением из явлений, подчиняющихся второму закону термодинамики [2].

Аксиома 11. Нейропсихические структуры мышления формируются посредством физического самоорганизующегося ψ -поля [2, 14].

Математика в ее формализованном и абстрактном виде в конечном итоге есть специфическое отражение реального мышления. Математику можно рассматривать как аксиоматику мышления, а психологию и нейрофизиологию мышления — как экспериментальные науки. При этом физика должна определять условия осуществимости механизмов мышления. Разработанный в математике и физике аппарат позволяет описать и объяснить особенности тех состояний мышления, генезис и функционирование которых исследуют нейрофизиология и психология. Изучение формирующихся структур мышления посредством самоорганизующегося ψ -поля проходит как фиксация стадий, соответствующих логико-алгебраическим структурам. Нейропсихические структуры мышления подвижны и динамичны, а логико-алгебраические структуры являются статическими характеристиками состояний равновесия мышления. На основании вышеизложенных аксиом взаимосвязь структур формирующегося мышления можно представить в виде схемы



- Здесь $\circ \rightarrow$ — формирующееся и направляющее самоорганизующееся ψ -поле мозга;
 \Rightarrow — стремление к пределу;
 $\leftarrow - \rightarrow$ — взаимозависимость;
 \Leftrightarrow — взаимно-однозначное соответствие (изоморфизм);
 S_1, S_2, \dots — нейронные уровни структур мышления;
 S'_1, S'_2, \dots — психические (операциональные) уровни структур мышления;
 e_1, e_2, \dots — логико-алгебраические структуры, соответствующие парам $(S_1, S'_1), (S_2, S'_2), \dots$.

Математические структуры и нейропсихические структуры мышления

Источником анализа структур мышления являются математические структуры: с одной стороны, это заимствованные из психологии и нейрофизиологии представления об операциях, системах операций, о равновесиях операций; с другой — математические принципы исследования структурных образований типа групп, решетки и т. д. [3, 9]. «Математические» структуры мышления должны удовлетворять двум требованиям: они должны быть математически значимы, иметь адекватное применение к данным экспериментальной психологии и нейрофизиологии мышления.

Задать математическую структуру в широком смысле — значит задать множество A произвольной природы (основное множество), множество Ω_f алгебраических операций, определенных на A , множество Ω_p — предикатов, определенных на A (Ω_p, Ω_f — вспомогательное множество), и множество аксиом C , которым удовлетворяют операции и предикаты:

$$U = \langle A, \Omega_f, \Omega_p, C \rangle.$$

Элементами Ω_p, Ω_f являются соответственно n -арные операции и n -арные предикаты [15] $\Omega_f = \{F_0, F_1, \dots, F_n\}$, $\Omega_p = \{P_0, P_1, \dots, P_n\}$, где n -арность. Заметим, что F_0 — нульарная операция, означающая просто фиксацию элемента множества A ; P_0 — нульарный предикат, характеризующий высказывание.

Подмножество $A_1 \neq \emptyset$ основного множества A некоторой структуры $U = \langle A, \Omega_f, \Omega_p, C \rangle$ называется замкнутым в структуре U , если A_1 замкнуто относительно каждой главной операции (отношения) F_ξ этой структуры:

$$F_\xi(x) = y \quad (x, y \in A_1).$$

Аналогично для предиката $P_\eta \in \Omega_p$.

Обозначим через F_ξ^*, F_η^* операции и предикаты, определенные на A_1 , значения которых на A совпадают соответственно со значениями операций $F_\xi \in \Omega_f$ и предикатов $P_\eta \in \Omega_p$. В результате

получим структуру $U_1 = \langle A_1, \Omega^*, \Omega_p^*, C^* \rangle$ ($C^* = C$), называемую подструктурой структуры U .

Наделяя элементы основного и вспомогательного множеств A , Ω_f , Ω_p , C содержанием и свойствами, взятыми из нейрофизиологии и психологии мышления, получим множество структур мышления. Обозначим множество нейронных структур через M , множество психологических структур мышления — через N .

Рассмотрим свойства структур мышления. Одно из свойств подструктур из множеств M или N раскрывает

Теорема 1. *В любой структуре $U = \langle A, \Omega_f, \Omega_p, C \rangle$, ($U \in M \cup N$) пересечение произвольной совокупности подструктур $\{U_i\}_i^n$ либо пусто, либо является подструктурой.*

Доказательство. Докажем сначала, что пересечение D произвольных совокупностей $\{A_\alpha/\alpha \in T\}$ замкнутых множеств A_α множества A либо пусто, либо замкнуто. Пусть $D \neq \emptyset$. Производя какую-нибудь главную операцию $F_\xi \in \Omega_f$ над произвольными элементами из D , получим некоторый элемент $a \in A$. Так как произвольное множество A_α замкнуто относительно операции F_ξ и содержит элементы a_1, \dots, a_{m_ξ} , элемент $a \in A_\alpha$. Поэтому $a \in D$, что и требовалось доказать.

Аналогично проводим рассуждения для $P_\eta \in \Omega_p$ в силу теоремы о взаимно-однозначном соответствии n -арной операции n -арному предикату [10].

Система аксиом S для всех подструктур не меняется.

Следствие. *Пусть среди главных предикатов и операций есть нульарные. Тогда главные элементы структуры U , которые содержатся в каждой подструктуре, входят и в пересечение любой совокупности подструктур. Следовательно, для подструктур с главными элементами пересечение любой совокупности подструктур есть снова подструктура [16].*

Пусть M — множество нейронных структур. Возьмем $U \in M$; $U = \langle A, \Omega_f, \Omega_p, C \rangle$. Пусть B — подмножество нейронов множества A . Совокупность $H = \{A_\alpha/\alpha \in T\}$ подмножеств A_α множества A называется локальной в B , если любое конечное подмножество из B содержится в некотором множестве A_α из совокупности H . Совокупность H , локальная в своем объединении, т. е. локальная в множестве $B = \bigcup_{\alpha \in T} A_\alpha$, называется просто локальной [16].

Теорема 2. *Объединение непустой локальной совокупности H подструктур произвольной структуры U является подструктурой структуры U .*

Доказательство. Пусть F_ξ — какая-нибудь главная операция структуры U и a_1, \dots, a_{m_ξ} — произвольные элементы объединения H . По условию совокупности H найдется подструктура U_α , содержащая элементы a_1, \dots, a_{m_ξ} , а потому и элемент $F_\xi(a_1, \dots, a_{m_\xi})$. Однако элемент $F_\xi(a_1, \dots, a_{m_\xi})$ вместе со

структурой U_α содержится в объединении, поэтому последнее замкнуто относительно каждой главной операции.

В силу теоремы о взаимно-однозначном соответствии n -арных операций и предикатов [10], элемент $P_\eta(a_1, \dots, a_{m_\eta})$ вместе с U_α содержится в объединении, что и требовалось доказать.

Следствие 1. *Объединение возрастающей цепочки нейронных подструктур*

$$U_1 \subset U_2 \subset U_3 \subset \dots \subset U_n$$

произвольной структуры U является нейронной подструктурой подструктуры U .

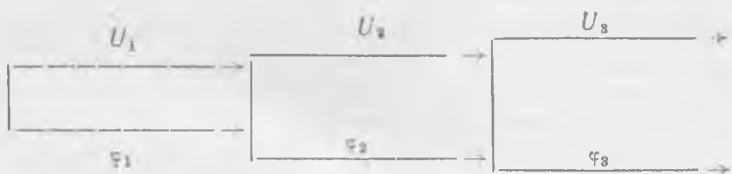
Следствие 2. *В силу аксиомы 5 теорема 2 справедлива и для объединения психических подструктур.*

Круговое свойство структур мышления

Из анализа структур мышления вытекает круговая зависимость между ними: физико-химические, нейронные и операциональные структуры связаны отношением взаимозависимости. Они соответствуют логико-алгебраическим структурам и между ними существует отношение изоморфизма. Логико-алгебраические структуры являются пределом нейропсихических структур мышления, о чем свидетельствует схема.



В процессе развития структуры мышления нейронного и психического уровней усложняются. Рассмотрим вложение одних структур в другие. Пусть имеется множество нейронных структур M (аналогично — множество психических структур N). Из M выберем бесконечную последовательность однотипных структур $U_1, U_2, \dots, U_i, \dots$, и пусть для структуры U_i задан изоморфизм φ_i ее отображения в структуру U_{i+1} . Структуры U_i на схеме показаны отрезками, а изоморфизм φ_i — проектированиями [16].



Отождествляя U_1 с $U_1\varphi_1$, U_2 с $U_2\varphi_2$ и т. д., получаем последовательность вложенных одна в другую структур

$$U_1 \subseteq U_2^* \subseteq U_3^* \dots \quad (2)$$

Это значит, что если

$$U_k^* = \langle A_k, \{F_{k\xi}\}, \{P_{k\eta}\}, \{C_k\} \rangle (\xi < \alpha, \eta < \beta),$$

то

$$\begin{aligned} A_1 &\subseteq A_2 \subseteq A_3 \subseteq \dots \\ F_{1\xi} &\subseteq F_{2\xi} \subseteq F_{3\xi} \subseteq \dots \\ P_{1\eta} &\subseteq P_{2\eta} \subseteq P_{3\eta} \subseteq \dots \end{aligned}$$

Пусть A, F_ξ, P_η, C — объединение соответствующих множеств $A_k, A_{k\xi}, P_{k\eta}, C_k$. В силу теоремы 2 совокупность $U = \langle A, \{F_\xi\}, \{P_\eta\}, C \rangle$ — структура, содержащая $U_1, U_2^*, U_3^* \dots$ в качестве своих подструктур. Структура U называется объединением возрастающей цепочки структур (2). Последовательность изоморфизмов структур

$$U_1 \xrightarrow{\varphi_1} U_2 \xrightarrow{\varphi_2} U_3 \xrightarrow{\varphi_3} \dots$$

называется прямым спектром, а структура U — пределом этого спектра [16].

Пусть K — множество физических, M — нейронных, N — психических структур мышления, Q — математических структур. Тогда справедлива

Теорема 3. *Множество структур мышления $G = G(K, M, N, Q)$ обладает круговым свойством.*

Доказательство. Возьмем возрастающую последовательность изоморфно вложенных друг в друга структур из K

$$K_1 \xrightarrow{\varphi_1} K_2 \xrightarrow{\varphi_2} K_3 \xrightarrow{\varphi_3} \dots \rightarrow K_n \rightarrow \dots \quad (3)$$

или

$$K_1^* \subseteq K_2^* \subseteq K_3^* \subseteq \dots \subseteq K_n^* \subseteq \dots \quad (3a)$$

В силу аксиомы 5 существует изоморфное отображение F_1 множества K на множество M . Применяя F_1 к последовательности (3a), получаем

$$F_1 K_1 \xrightarrow{\varphi_1} F_1 K_2 \xrightarrow{\varphi_2} F_1 K_3 \xrightarrow{\varphi_3} \dots \rightarrow F_1 K_n \rightarrow \dots \quad (4)$$

или

$$F_1 K_1 \subseteq F_1 K_2^* \subseteq F_1 K_3^* \subseteq \dots \subseteq F_1 K_n^* \subseteq \dots \quad (4a)$$

В силу аксиомы 7 для последовательности (4a) существует предельная структура Q_1 , т. е.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \bigcup_{n=1}^{\infty} F_1 K_n = Q_1, \quad (5)$$

где $Q_1 \in Q$.

Проводя аналогичные рассуждения для множества психических структур мышления N , получаем

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \bigcup_{n=1}^{\infty} F_2 K_n = Q_2, \quad (6)$$

где F_2 — изоморфное отображение множества K на N и $Q_2 \in Q$. Из выражений (3a), (4a), (5), (6) вытекает круговое свойство мышления.

В заключение сформулируем некоторые проблемы физико-математической теории мышления:

- 1) изучение механизма образования нейронных структур мышления и физические условия их функционирования;
- 2) изучение механизма образования операциональных (психических) структур мышления;
- 3) исследование конкретного содержания антиэнтропийного механизма, посредством которого мозг осуществляет процесс логического мышления;
- 4) исследование конкретной структуры самоорганизующегося ψ -поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кобозев Н. И. Ж. физ. хим., **40**, 784 (1966), с. 791—794.
2. Кобозев Н. И. Исследование в области термодинамики процессов информации и мышления. Изд-во МГУ, 1971. 194 с.
3. Мак-Каллок У., Питтс У. Логическое исчисление идей, относящихся к нервной активности. Сб. «Автоматы». М., ИЛ, 1956, с. 362—385.
4. Чудаков В. Н., Кононенко К. И. Некоторые алгебраические модели нейронных структур. Сб. «Проблемы бионики», вып. 9. Изд-во Харьковск. ун-та, 1972, с. 89—97.
5. Пиаже Ж. Избранные психологические труды. М., «Просвещение», 1969. 659 с.
6. Пиаже Ж. Генезис элементарных логических структур. М., ИЛ, 1963. 448 с.
7. Пиаже Ж. Роль действия в формировании мышления. «Вопросы психологии», 1965, № 6. с. 648—660.
8. Флейвелл Дж. Х. Генетическая психология Ж. Пиаже. М., «Просвещение», 1969. 623 с.
9. Пиаже Ж. Структуры математические и операторные структуры мышления. Сб. «Преподавание математики». М.—Л., Учпедгиз, 1960. с. 3—26.
10. Чудаков В. Н. Об изоморфизме структур мышления нейронного и психологического уровней. Сб. «Проблемы бионики», вып. 10. Изд-во Харьковск. ун-та, 1973. с. 66—73.

11. Фресс П., Пиаже Ж. Экспериментальная психология. М., «Просвещение», 1966, с. 157—195.
12. Зисман Э., Бьюнеман О. Толерантные пространства и мозг. Сб. «На пути к теоретической биологии». М., «Мир», 1970, с. 134—154.
13. «Уч. записки Владимирск. пед. ин-та, сер. «Педагогика и психология», вып. 2. «Вопросы математического моделирования и структурного исследования психической деятельности». Владимир, 1968, с. 3—25.
14. Гурвич А. В. Теория биологического поля. М., «Сов. наука», 1944. 156 с.
15. Чудаков В. Н. Алгебраическая природа структур формирующегося мышления. Сб. «Проблемы бионики», вып. 10. Изд-во Харьковск. ун-та. 1973, с. 49—57.
16. Мальцев А. И. Алгебраические системы. М., Физматгиз, 1970. 384 с.

ОБ ОДНОЙ ЗАДАЧЕ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ

М. Ф. Бондаренко, Э. М. Бузницкая

В настоящее время назрела необходимость в изучении закономерностей мыслительной деятельности человека для ее моделирования, и разработка закономерностей человеческого мышления, являющегося объектом психологии, становится чрезвычайно актуальной. Целью данной работы является изучение психологических аспектов принятия человеком решений, а именно моделирование морфологической классификации множества имен прилагательных по типам склонения, числу и роду.

В класс имен прилагательных, образующих множество входных сигналов, помимо полных форм, которые изменяются по родам, числам и падежам, входят так называемые краткие формы, которые в дополнении к основным 24 формам парадигмы прилагательного образуют еще четыре: три формы единственного числа и одну — множественного. Компаратив, или форма сравнительной степени, не имеет грамматических значений рода, числа и падежа и относится к морфологическому разряду неизменяемых слов. Определенное таким образом множество входных сигналов для удобства назовем прилагательными I класса.

Математическим обоснованием существования таких моделей может служить аксиома достаточности формальных признаков для отнесения элементов исходного множества к определенному классу. Принцип действия рассматриваемых моделей основан на известном в кибернетике нуль-методе [1].

В задаче I требуется построить такую математическую модель, описывающую поведение абсолютно грамотного человека (для чего в качестве эталона использовалась грамматика русского языка [2]), которая бы на основании набора формальных признаков, полученных путем непосредственного склонения слов, позволила произвести морфологическую классификацию имен прилагательных I класса по отношению подобия системы падежных окончаний. Обработываемые прилагательные, образующие

класс входных сигналов, считаются приведенными к каноническому виду (именительный падеж, единственное число, мужской род). Приведение к такой форме представляет собой отдельную задачу.

На выходе полученной модели вырабатываются сигналы, определяющие тип склонения, который в результате сравнения на нуль-органе дает окончательный результат — сигнал «да» или «нет», характеризующий совпадение или несовпадение типов склонения указанных имен прилагательных.

Выявленные формальные признаки позволяют выделить шесть типов склонения классифицируемых прилагательных (таблица)

Тип склонения	Формальные признаки слов
1	Окончание <i>-ый</i> , основа на <i>ц</i>
2	» <i>-ый</i> —
3	» <i>-ий</i> , основа на <i>г, к, х</i>
4	» <i>-ий</i> —
5	» <i>-ой</i> , основа на <i>г, к, х, ж, ш</i>
6	» <i>-ой</i> —

Оператор преобразования входных сигналов в выходные может быть расшифрован с помощью блок-схемы (рис. 1).

Функционирование алгоритма может быть описано следующим образом. На вход *B* подается закодированное прилагательное,

отвечающее требованиям для входных сигналов. Далее слово проходит через ряд распознавателей, которые проверяют элементы слова (две или три последние буквы слова) на совпадение с буквенными константами, запасенными в машине. Так, Φ_1 сравнивает



Рис. 1.

две последние буквы слова с *ый*, Φ_2 — третью от конца букву слова с *ц*, Φ_3 — две последние буквы с *ий*, Φ_4 — третью от конца букву с *г, к, х*, Φ_5 — две последние буквы слова с *ой*, Φ_6 — третью от конца букву слова с *г, к, х, ж, ш*.

Каждый распознаватель имеет два выхода (на блок-схеме это стрелки, снабженные знаками плюс или минус, которые указывают на тот блок, к которому следует переходить в случае положительного или отрицательного ответа). Выработываемый сигнал *A. O.* — аварийный останов — предполагает необходимость проверки правильности выходного слова.

Рассмотрим математическую модель классификации имен прилагательных I класса, заданных в произвольной форме по числу.

В процессе расшифровки алгоритма для построения модели необходимо составить набор формальных признаков, позволяющих

разрешить данную задачу. Как и в первом случае, носителями необходимой морфологической информации являются последние (одна, две или три) буквы слова (в одном случае это окончание, характерное для прилагательных, в другом задача неразрешима без учета характера основ). В общем случае алгоритм, построенный на основании таких формальных признаков, дает возможность получать совершенно однозначный ответ: единственное или множественное число. Однако необходимо помнить о существовании незначительной группы кратких прилагательных, которые имеют нулевую флексию, но оканчиваются на *-их*.

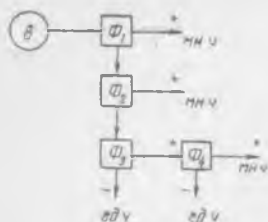


Рис. 2.

Следует также иметь в виду, что если прилагательное имеет окончания *-ым*, *-им*, то решения требует следующий случай омонимии: творительный падеж единственного числа (дательный падеж множественного числа). Поэтому здесь в блок-схему алгоритма целесообразно вводить определение числа имени прилагательного особого оператора, который бы вызывал из «памяти» машины дополнительную информацию о входном слове на *-ым*, *-им* (в данном случае — признак дательного падежа).

Блок-схема алгоритма, позволяющего на основании формальных признаков, заложенных в морфологической структуре слова, определять число прилагательных I класса, представлена на рис. 2.

Алгоритм может работать следующим образом. На вход подается прилагательное I класса, которое проверяется на совпадение с определяющими то или иное число формальными признаками. Распознаватель Φ_1 проверяет совпадение последней буквы слова с *ы*, *и*, Φ_2 — совпадение двух последних букв слова с *ые*, *ие*, *ых*, *их*, *ми*, Φ_3 — совпадение двух последних букв слова с *ым*, *им*. В случае положительного ответа слово поступает на распознаватель Φ_4 , который проверяет наличие информации о признаке падежа этого слова. В остальном работа распознавателей Φ_1 — Φ_4 аналогична с описанной выше.

В заключение рассмотрим модель классификации прилагательных I класса по роду. Грамматические значения рода у имен прилагательных чисто синтаксические, но они вполне могут быть определены с помощью системы формальных признаков. Представленная ниже модель полностью решает задачу об определении рода любого прилагательного I класса, однако следует остановиться на одной ее особенности. Она заключается в том, что на выходе распознавателей Φ_4 , Φ_9 , Φ_{10} возникают неоднозначные ответы, отражающие явление омонимии для окончаний, проверку на совпадение с которыми осуществляют эти распознаватели. Такие неоднозначные ответы правильно отражают характер речевой деятельности человека. Это подтверждают психологические эксперименты (если испытуемому предложить определить род

прилагательного «большим», то последует ответ «мужской (средний) род»). Блок-схема определения рода имени прилагательного I класса имеет следующий вид (рис. 3):

- Ф₁ — сравнивает последнюю букву слова с о, е;
- Ф₂ — » » » » а, я;
- Ф₃ — » » » » б и согласными;

Ф₄ — сравнивает две последние буквы слова с *ым, им, ом, ем*;

Ф₅ — сравнивает две последние буквы слова с *ой*;

Ф₆ — проверяет наличие признака именительного (винительного) падежа;

Ф₇ — сравнивает две последние буквы с *ое; ее*;

Ф₈ — сравнивает три последние буквы слова с *ого, его*;

Ф₉ — проверяет наличие признака винительного падежа;

Ф₁₀ — сравнивает три последние буквы слова с *ому, ему*.

Описанные алгоритмы морфологической классификации реализованы на ЭВМ «Минск-22».

Предложенные модели морфологической классификации могут быть использованы для более сложного синтеза и анализа фраз и предложений русской речи.

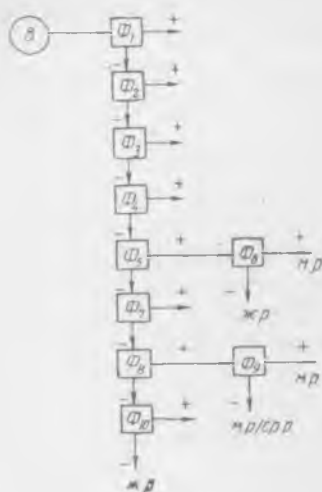


Рис. 3.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шабанов-Кушнарченко Ю. П., Якименко Л. И. Об одной математической модели морфологической классификации множества имен существительных русского языка. Сб. «Проблемы бионики», вып. 6. Изд-во Харьковск. ун-та, 1971, с. 104—107.

2. Грамматика русского языка, т. I. М., изд. АН СССР, 1960. 719 с.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ КЛАССИФИКАЦИИ ГЛАГОЛОВ ПО ПРИЗНАКУ ЛИЦА

Ю. П. Шабанов-Кушнарченко, Е. А. Соловьева

В настоящее время возрос интерес к моделированию психических функций человека, в частности человеческого языка, на ЭВМ. Математическое моделирование речевого поведения ограничивается пока решением отдельных задач по переработке словесной информации. Такой подход не только дает возможность обучать ЭЦВМ принятию решений аналогично человеку в различных ситуациях речевой деятельности, но и приближает к разрешению общих проблем.

Человек способен решать задачи морфологической классификации, т. е. классифицировать части речи по некоторым признакам. Нас интересуют математические модели поведения идеально грамотного человека* (и. г. ч.) при решении таких задач классификации, например, при классификации глаголов по признаку лица. И. г. ч. предъявляется глагол (например, входящий в словарь русского языка [2]) в любой форме, представляющей собой одно слово. На основании только этой информации и. г. ч. должен принять решение, к какому лицу отнести предложенную глагольную форму (если последняя имеет признак лица) или ответить, что глагольная форма признака лица не имеет (если у данной формы глагола его нет). Таким образом, человек должен принять решение, какой из четырех признаков (1-е лицо, 2-е лицо, 3-е лицо, отсутствие лица) необходимо поставить в соответствие любому данному глаголу. Глагол предъявляется и. г. ч. без контекста. Поэтому когда предложенный глагол является омографом и без контекста его классификация может быть различной, верным ответом при выборе решения следует считать набор признаков лица, соответствующих данному глаголу.

Математическая модель способности и. г. ч. принимать решения при классификации глаголов по признаку лица в виде блок-схемы алгоритма приведена на рисунке. Множество входных сигналов $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ составляют все глаголы русского языка, входящие в словарь [2], и те их формы, которые представляют собой одно слово. Множество выходных сигналов $Y = \{y_1, \dots, y_m\}$ — это множество X , классифицированное по признаку лица, т. е. выходной сигнал y_i — это входной сигнал x_i с добавлением признака лица: Π_1 — если глагол стоит в 1-м лице; Π_2 — если глагол во 2-м лице; Π_3 — если в 3-м и $\neg\Pi$ — если предложенная глагольная форма не имеет признака лица. Если же классификация глагола при отсутствии контекста окажется неоднозначной, то приписываемый глаголу признак объединит все признаки лица, соответствующие данному глаголу, например, $\Pi_1 \wedge \Pi_2$ или $\Pi_2 \wedge \neg\Pi$ и т. д.

Подавая на вход B алгоритма какое-либо слово, на его выходе B получаем то же слово с добавлением признака лица. После этого на вход алгоритма можно подавать новое слово.

Алгоритм составлен на основании только формальных признаков. Он использует анализ одной или нескольких последних букв слова, кроме случаев, когда это может привести к ошибкам. То-

* В данном случае имеется в виду человек, который решает предложенную задачу классификации точно в соответствии с правилами грамматики русского языка [1].

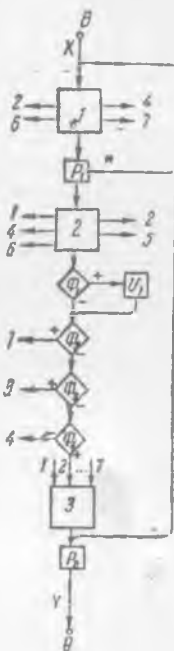
гда допускается минимально возможный словарь исключений. В нашем алгоритме обращение к словарям осуществляется в блоках 1 и 2.

Алгоритм включает в себя элементарные блоки и составные, которые, в свою очередь, состоят из элементарных. Рассмотрим работу элементарных блоков нашего алгоритма: распознавателей и операторов. Распознавателем Φ_j назовем блок, который проверяет, удовлетворяет ли слово, поданное на его вход, какому-либо условию, причем в случае выполнения данного условия слово выходит из блока по стрелке, отмеченной знаком плюс; в случае невыполнения — по стрелке со знаком минус. Блок U_i , который изменяет поступающий на его вход сигнал, т. е. совершает над этим сигналом определенную операцию, назовем оператором.

Распознаватели, входящие в состав алгоритма (рисунок), выполняют проверку следующих условий: Φ_1 проверяет две последние буквы слова на «ся» или «сь»; Φ_2 — последнюю букву слова на «у», «ю» или «м»; Φ_3 — ту же букву на «т», а Φ_4 — на «б», «й» или «е». Оператор U_1 отбрасывает две последние буквы слова.

Блок P_k выполняет одновременно функции оператора и блока памяти. Каждое слово, поданное на вход блока P_1 , который отмечен звездочкой, запоминается в нем (при этом стирается находящаяся в блоке P_1 информация). На выходе блока P_1 слово, поданное на отмеченный вход, появится только в том случае, если следующий сигнал будет подан на неотмеченный вход. Блок P_2 запоминает поданный на его вход сигнал, а затем приписывает к нему поданный через некоторое время признак; полученный сигнал y_i поступает на выход алгоритма, после чего на вход алгоритма можно подавать новое слово.

Блок 3 является составным оператором формирования признаков лица. Он представляет собой параллельное соединение элементарных операторов, каждый из которых может заменять входное слово на какой-либо признак лица. Каждому элементарному оператору соответствует один пронумерованный вход блока 3, а выходы элементарных операторов соединены, образуя выход блока 3. При подаче слова на вход 1 слово заменяется признаком Π_1 ; при подаче на вход 2 — признаком Π_2 ; 3 — Π_3 ; 4 — $\neg\Pi_1$; 5 — $\Pi_1 \wedge \Pi_2$; 6 — $\Pi_2 \wedge \neg\Pi_1$; 7 — $\Pi_3 \wedge \neg\Pi_1$. Цифра на выходе любого блока означает, что этот выход соединяется с таким же образом пронумерованным входом блока 3.



Блоки 1 и 2 классифицируют небольшую часть глагольных форм, которые, обладая одинаковыми формальными признаками, являются омографами или же представляют собой исключения из общих правил. В состав блоков 1 и 2 входят распознаватели и операторы, принцип действия которых описан выше, а также распознаватели типов $\Phi_{И_e}$ и $\Phi_{С_m}$. Распознаватель типа $\Phi_{И_e}$ проверяет, совпадает ли конец входного слова с каким-либо одним из слов словаря $И_e$, а $\Phi_{С_m}$ — совпадает ли входное слово с одним из слов словаря $С_m$.

Блок 1 классифицирует (в данном случае — направляет на соответствующий пронумерованный выход) глаголы, оканчивающиеся на «ть», «чь», «ти» («тсья», «чься», «тись»). Этот блок по своему содержанию аналогичен алгоритму, предложенному в работе [3], который выполняет классификацию глаголов по признаку формы (неопределенной или личной). Блок 2 классифицирует глаголы, которые в 1-м лице изъявительного наклонения и во 2-м лице повелительного являются омоформами; глаголы, которые оканчиваются на «ли» («лись»), «-ка», а также глаголы типа «ляг». При решении данной задачи входным алфавитом является русский, расширенный дефисом (дефис может встречаться в глаголах повелительного наклонения, оканчивающихся на «-ка»). Введение во входной алфавит знака ударения в единичных случаях позволит избежать двойного ответа. Поскольку число таких случаев мало, а расширение входного алфавита знаком ударения усложняет алгоритм, то подобное расширение не проводилось в данной работе. Решая поставленную задачу, мы стремились свести объем словарей исключений к минимально возможному. В результате суммарный объем словаря в процессе отладки алгоритма значительно уменьшился. Количество входных слов алгоритма более чем в 1000 раз превышает число всех слов-исключений.

Метод решения поставленной задачи [3] предполагает получение точного решения для любого слова, входящего в выбранное множество входных слов. Это подтвердил анализ составленной модели, а также многочисленные эксперименты.

Предложенная математическая модель принятия решений в процессе классификации глаголов по признаку лица может оказаться полезной при составлении других подобных моделей, а также представить самостоятельный интерес.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грамматика современного русского литературного языка. М., «Наука» 1970. 767 с.
2. Орфографический словарь русского языка, изд. 2-е. М. «Сов. энциклопедия», 1971. 520 с.
3. Бондаренко М. Ф., Соловьева Е. А. Методы решения задач морфологической и субморфологической классификации. Сб. «Проблемы бионики», вып. 10. Изд-во Харьковск. ун-та, 1973, с. 145—150.

СОДЕРЖАНИЕ

Ю. П. Шабанов-Кушнарченко, М. Ф. Бондаренко, Е. А. Соловьева. Математическая модель определения грамматической категории рода глаголов русского языка	3
Е. П. Путятин, Б. К. Лопатченко, В. Б. Левиков, Б. Я. Сердюченко. Нормализация изображений при изменении яркости и контрастности	5
Ю. А. Куманин, Ю. И. Зозуля, В. Г. Червов. Модели цветowych рецептивных полей сетчатки суслика	13
В. И. Потапов, В. Ф. Нестерук. Минимизация процесса восстановления в функционально устойчивых логических сетях из элементов нейронного типа	22
В. А. Ловицкий. Классификация словесных задач. Сообщение I	26
В. В. Морозов. Энергетические оценки силовых взаимодействий как параметры, кодирующие образ, и связь этих оценок с параметрами термодинамики	30
Ю. П. Бугай, В. А. Бахтигозин, Ю. И. Зозуля, В. Г. Червов. Оптические модели детекторов признаков зрительных сигналов	40
В. В. Морозов. О возможной роли «магнитных» свойств в кодировании наследственной информации	44
В. Н. Чудаков. Физико-математический анализ и формализация структуры патологического мышления	51
М. М. Гохлернер, П. Б. Невельский. К вопросу о единицах решений при восприятии вербального материала	59
Р. А. Гуревич, В. А. Внуков. Исследование некоторых характеристик опорно-двигательной системы человека	66
В. Ф. Ананин. Биомеханика аккомодационного аппарата глаза человека	69
Е. П. Путятин, Б. К. Лопатченко, В. Б. Левиков, О. М. Абрамов. Автоматическая нормализация при комбинированных преобразованиях изображений	75
С. И. Шапиро. Теоретико-информационная модель механизма логических координат	80
Е. И. Кабанова, В. А. Махонин. Изучение оценок сходства изображений приемами синтеза экононых описаний	86
Ф. Д. Дубинин. Принципы построения оптоэлектронных моделей однородных биологических систем с латеральным торможением и распространяющимся возбуждением	95
В. А. Горбачев, А. Г. Евдокимов, В. В. Матейченко. К вопросу о создании алгоритма обработки триангуляционных наблюдений с возможным участием оператора в условиях неполной информации	102
В. П. Романов, С. С. Терещенко. Аппаратные методы моделирования процессов анализа сложных изображений	111
С. С. Терещенко, В. П. Романов. Об одной модели электронно-оптического преобразования и алгоритме осмотра сложных графических изображений	120
В. Н. Чудаков. К вопросу об аксиоматическом построении теории мышления	125
М. Ф. Бондаренко, Э. М. Бузницкая. Об одной задаче морфологической классификации	136
Ю. П. Шабанов-Кушнарченко, Е. А. Соловьева. Математическая модель принятия решений при классификации глаголов по признаку лица	139

РЕФЕРАТЫ

УДК 62.506.2

Математическая модель определения грамматической категории рода глаголов русского языка. Шабанов-Кушаренко Ю. П., Бондаренко М. Ф., Соловьева Е. А. Сб. «Проблемы бионики», вып. 11, 1973, стр. 3—5.

Составлена математическая модель способности человека определять род глаголов русского языка. Модель реализована на ЭЦВМ «Минск-22».

Рисунков 3. Библиографических ссылок 4.

УДК 62.506.2

Нормализация изображений при изменении яркости и контрастности. Путятин Е. П., Лопатченко Б. К., Левиков В. Б., Сердюченко Б. Я. Сб. «Проблемы бионики», вып. 11, 1973, стр. 5—13.

Рассмотрена нормализация зрительных картин при изменении уровня яркости и контрастности. Приведены необходимые и достаточные условия для построения видов операторов нормализации. Описана техническая реализация алгоритмов нормализации.

Рисунков 2. Библиографических ссылок 4.

УДК 62.506.2

Модели цветowych рецептивных полей сетчатки суслика. Куманин Ю. А., Зозуля Ю. И., Червов В. Г. Сб. «Проблемы бионики», вып. 11, 1973, стр. 13—21.

С помощью математических моделей исследованы принципы обработки цветовой информации в сетчатке суслика. Описаны четыре класса цветowych рецептивных полей, имеющих различные структурно-функциональные характеристики.

Таблиц 2. Библиографических ссылок 13.

УДК 62.506.2

Минимизация процесса восстановления в функционально устойчивых логических сетях из элементов нейронного типа. Потапов В. И., Нестерук В. Ф. Сб. «Проблемы бионики», вып. 11, 1973, стр. 22—26.

Рассмотрена задача о минимизации процесса восстановления заданной функции F_K на выходе сети ФН, т. е. о минимизации числа перестроек ФН, а следовательно, и времени восстановления сети. Задача решена для регулярных двухранговых сетей с нейронами в первом ранге и с одним ФН — во втором.

Таблиц 1. Библиографических ссылок 6.

УДК 62.506.2

Классификация словесных задач. Сообщение 1. Ловицкий В. А. Сб. «Проблемы бионики», вып. 11, 1973, стр. 26—30.

Предпринята попытка формализовать понятие задачи с целью строгого описания системы классификации словесных задач. Представление словесных задач в виде иерархической структуры позволит не только установить очеред-

ность их решения, но и подойти к проблеме создания специализированного информационного языка для общения с ЭЦВМ в режиме диалога.

Библиографических ссылок 4.

УДК 62.506.2

Энергетические оценки силовых взаимодействий как параметры, кодирующие образ, и связь этих оценок с параметрами термодинамики. Морозов В. В. Сб. «Проблемы бионики», вып. 11, 1973, стр. 30—39.

Рассмотрено использование энергетических оценок состояний простейших систем, силовые поля в которых адекватны записанной с их помощью графической информации. Проведена аналогия между указанными оценками и соответствующими параметрами термодинамики. Сделан вывод о целесообразности использования методов статистической физики и термодинамики при анализе процессов кодирования и обработки информации в биологических системах.

Рисунков 2. Библиографических ссылок 1.

УДК. 62.506.2

Оптические модели детекторов признаков зрительных сигналов. Бугай Ю. П., Бахтигозий В. А., Зозуля Ю. И., Червов В. Г. Сб. «Проблемы бионики», вып. 11, 1973, стр. 40—44.

Рассмотрены оптические моделирующие системы, которые осуществляют линейные интегральные операции, а также обеспечивают выделение различных признаков предъявляемых изображений и сложных изображений в целом.

Рисунков 3. Библиографических ссылок 4.

УДК 62.506.2 + 575 + 577.1

О возможной роли «магнитных» свойств в кодировании наследственной информации. Морозов В. В. Сб. «Проблемы бионики», вып. 11, 1973, стр. 44—51.

Из информационных ячеек (конструкций из двух совмещенных гранями тетраэдров) предложено собирать модель молекулы ДНК, геометрические особенности которой достаточно точно соответствуют особенностям оригинала. Показано, что если информационная ячейка обладает вектором-моментом («магнитным» моментом), то с учетом геометрических свойств моделей молекулы ДНК можно построить «магнитный» код наследственности, который логически позволяет обосновать потребность тройки нуклеотидов для кодирования одной аминокислоты, неравномерность распределения числа генонов (кодонов) по отдельным аминокислотам, а также однозначное кодирование с его помощью не более 20—21 аминокислот.

Таблиц 1. Рисунков 6.

УДК 62.506.2

Физико-математический анализ и формализация структур патологического мышления. Чудаков В. Н. Сб. «Проблемы бионики», вып. 11, 1973, стр. 51—59.

Рассмотрены основные черты нарушений мышления формального и конкретного уровней. Доказаны теоремы об эгоцентрическом преобразовании, о склеивании (соположении) представлений в глобальное целое. Сформулированы аксиомы патологического мышления. Перечислены условия, являющиеся причиной нарушений логико-алгебраических свойств структур мышления. Описано нарушение физического механизма процесса логического мышления, связанное с утратой безэнтропийности мышления.

Библиографических ссылок 10.

УДК 62.506.2

К вопросу о единицах решений при восприятии вербального материала. Гохлернер М. М., Невельский П. Б. Сб. «Проблемы бионики», вып. 11, 1973, стр. 59—66.

Описано принятие человеком решений при распознавании вербального текста в условиях разной неопределенности. Выявлена зависимость принятия

решений от субъективной неопределенности и субъективной избыточности текста. Единицами решения являются лингвистические элементы на различных уровнях (включая неосмысленные буквосочетания), способствующие осмыслению элементов текста в их связи с контекстом. Полученные результаты могут иметь значение для теории и практики распознавания.

Библиографических ссылок 11.

УДК 6.506.2 **Исследование некоторых характеристик опорно-двигательной системы человека.** Гуревич Р. А., Внуков В. А. Сб. «Проблемы бионики», вып. 11, 1973, стр. 66—68.

Рассмотрена устойчивость линеаризированной двузвенной модели. На основании экспериментальных данных проведен анализ нелинейностей, определяющих поведение системы поддержания равновесия человека и качественное управление.

Библиографических ссылок 3.

УДК 62.506.2 **Биомеханика аккомодационного аппарата глаза человека.** Ананин В. Ф. Сб. «Проблемы бионики», вып. 11, 1973, стр. 69—74.

Рассмотрена биомеханика аккомодационного аппарата глаза человека, т. е. динамика распределения сил на глазном яблоке при аккомодации. Дана характеристика внутренних и внешних сил, воздействующих на глазное яблоко.

Рисунков 3. Библиографических ссылок 6.

УДК 62.506.2 **Автоматическая нормализация при комбинированных преобразованиях изображений.** Путятин Е. П., Лопатченко Б. К., Левиков В. Б., Абрамов О. М. Сб. «Проблемы бионики», вып. 11, 1973, стр. 75—80.

Рассмотрено построение алгоритмов нормализации зрительных картин, подвергнутых некоторым видам метрических и аффинных преобразований в условиях изменения уровня яркости и контрастности. Приведен пример построения технического устройства, реализующего один из алгоритмов.

Рисунков 1. Библиографических ссылок 4.

УДК 62.506.2 **Теоретико-информационная модель механизма логических координат.** Шапиро С. И. Сб. «Проблемы бионики», вып. 11, 1973, стр. 80—86.

Рассмотрены общность и различие процессов кодирования в технических системах и механизма свертывания — развертывания информации в психической деятельности человека. Исследована роль феномена сокращения мыслительных форм при решении задач в связи с алгоритмами в обучении и возникающими на их основе логическими координатами.

Таблиц 1. Библиографических ссылок 8.

УДК 62.506.2 **Изучение оценок сходства изображений приемами синтеза экономных описаний.** Кабанова Е. И., Махонин В. А. Сб. «Проблемы бионики», вып. 11, 1973, стр. 86—94.

Рассмотрено восстановление функции качества, задаваемой экспертными оценками. Описаны эксперименты по изучению сходства неполных контурных изображений с их эталонами, проводившиеся с использованием алгоритмов синтеза экономных описаний в неминимальной системе функций. Закономерности, выявленные в распределении оценок сходства, согласуются с известными свойствами восприятия.

Рисунков 3. Библиографических ссылок 6.

УДК 62.506.2

Принципы построения оптоэлектронных моделей однородных биологических систем с латеральным торможением и распространяющимся возбуждением. Дубинин Ф. Д. Сб. «Проблемы бионики», вып. 11, 1973, стр. 95—102.

Рассмотрено моделирование однородных биологических систем с прямым и обратным латеральным торможением и распространяющимся возбуждением. Модели разделены на однородные и мозаичные. В однородных применен эффект инфракрасного гашения фотопроводимости. Яркость электролюминофора мозаичных моделей регулируется посредством фоторезисторов, шунтирующих электролюминесцентный конденсатор элемента мозаики. Модели можно использовать в биофизических экспериментах, а также в качестве технической основы для построения однородных вычислительных и управляющих систем.

Рисунков 4. Библиографических ссылок 11.

УДК 62.506.2

К вопросу о создании алгоритма обработки триангуляционных наблюдений с возможным участием оператора в условиях неполной информации. Горбачев В. А., Евдокимов А. Г., Матейченко В. В. Сб. «Проблемы бионики», вып. 11, 1973, стр. 102—111.

Рассмотрена проблема обработки данных, полученных от избыточной триангуляционной системы в условиях неполной информации (известно только среднеквадратичное отклонение системы). Методами вероятностного моделирования произведена сравнительная проверка эффективности способов наименьших квадратов и разработанного авторами для обработки выборок. Поставлен вопрос о разработке алгоритма, оптимального для данной модели.

Таблиц 2. Рисунков 2. Библиографических ссылок 6.

УДК 621.391.19

Аппаратные методы моделирования процессов анализа сложных изображений. Романов В. П., Терещенко С. С. Сб. «Проблемы бионики», вып. 11, 1973, стр. 111—120.

Описаны методы моделирования процессов анализа графических изображений. В качестве оптимального измерителя, моделирующего отдельные этапы зрительного анализатора, предложены сканер и кодер, которые осуществляют поиск и обнаружение отдельных компонент изображения на физическом носителе, классификацию отдельных компонент сложных графических изображений.

Рисунков 1. Библиографических ссылок 9.

УДК 621.391.19

Об одной модели электронно-оптического преобразования и алгоритме осмотра сложных графических изображений. Терещенко С. С., Романов В. П. Сб. «Проблемы бионики», вып. 11, 1973, стр. 120—125.

Описаны модель и блок-схема адаптивного алгоритма осмотра сложных графических изображений. Особенностью алгоритма является возможность обработки пересекающихся и имеющих разрывы линий, а также предварительного уменьшения объема информации, поступающего при вводе изображений в ЭВМ.

Рисунков 2. Библиографических ссылок 3.

УДК 62.506.2

К вопросу об аксиоматическом построении теории мышления. Чудаков В. Н. Сб. «Проблемы бионики», вып. 11, 1973, стр. 125—136.

Изложены основные направления в изучении процессов и структур мышления с точки зрения физико-математических представлений. Сделана попытка сформулировать аксиоматику общей теории мышления. Введено понятие нейронных, психических структур мышления, обоснована их взаимосвязь с

148

математическими. Доказаны теоремы о свойствах подструктур мышления; а также теорема об их круговом свойстве.

Библиографических ссылок 16.

УДК 62.506.2

Об одной задаче морфологической классификации. Бондаренко М. Ф., Бузницкая Э. М. Сб. «Проблемы бионики», вып. 11, 1973, стр. 136—138.

Предложены математические модели морфологической классификации множества имен прилагательных по типам склонения, числу и роду. В основу построения моделей положена аксиома достаточности формальных признаков для отнесения элементов множества к определенному классу.

Рисунков 3. Библиографических ссылок 2.

УДК 62.506.2

Математическая модель принятия решений при классификации глаголов по признаку лица. Шабанов-Кушнарченко Ю. П., Соловьева Е. А. Сб. «Проблемы бионики», вып. 11, 1973, стр. 139—143.

Составлена математическая модель, описывающая поведение человека при решении одной из задач морфологической классификации. Модель получена в виде алгоритма, который реализован на ЭЦВМ «Минск-22».

Рисунков 1. Библиографических ссылок 3.